

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA  
Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Civil  
Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos



ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN INTENSIDAD Y  
FRECUENCIA DE RACHAS SECAS EN LA  
PENÍNSULA IBÉRICA

Proyecto Fin de Carrera

Presentado por David Carrasco Torres

Dirigido por Dra. Sandra G. García Galiano



Cartagena, Septiembre de 2009

# ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción .....	2
1.1 Objetivos del proyecto final de carrera.....	2
1.2 Importancia del problema .....	2
Capítulo 2: Análisis de antecedentes .....	4
2.1 Definición de sequía .....	4
2.2 Caracterización de las sequías y severidad .....	5
2.3 Impactos de las sequías.....	6
2.4 Tipos de sequías .....	8
2.5 Gestión y planificación de sequías .....	10
2.6 Índices de sequía .....	12
2.7 La sequía en España.....	14
Capítulo 3: Material y métodos .....	16
3.1 Proyecto ENSEMBLES.....	16
3.2 Modelos climáticos regionales (RCM).....	17
3.2.1 Escenarios del IE-EE .....	18
3.2.2 Períodos de análisis.....	21
3.3 Descripción de la zona de estudio.....	21
3.4 Introducción al SIG GRASS .....	22
3.5 Adquisición y procesamiento de información .....	23
3.6 Análisis de consistencia .....	28
3.7 Desarrollo del análisis en GRASS y en R .....	30
3.7.1 Rachas secas .....	30
3.7.2 Precipitación media anual.....	37
Capítulo 4: Análisis de resultados .....	39
4.1 Precipitación media anual.....	39
4.2 Rachas secas .....	51
Capítulo 5: Conclusiones .....	92
Capítulo 6: Referencias bibliográficas.....	94

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO FINAL DE CARRERA

El objetivo de este Proyecto Final de Carrera (PFC) es analizar las tendencias en la frecuencia y magnitud de eventos de sequía (rachas secas) para diferentes regiones de la Península Ibérica a partir del análisis de datos de precipitación obtenidos desde Modelos Climáticos Regionales (RCM), contrastando el período de control 1961-90 con proyecciones al 2080. Entendiendo a las rachas secas como periodos consecutivos de días sin precipitación apreciable, se estudia la longitud de las mismas frente a su frecuencia. El trabajo se basa en proyecciones climáticas regionales (precipitaciones), líneas RT2B y RT3, del Proyecto Integrado Europeo ENSEMBLES. De entre las simulaciones generadas bajo ENSEMBLES, se han seleccionado las correspondientes a los RCMs: HIRHAM, RCA y RegCM.

### 1.2 IMPORTANCIA DEL PROBLEMA

De todos es bien sabido el problema que supone el agua en nuestro país y más aún en la Cuenca del Segura, debido a que determina en gran medida el buen funcionamiento de los sistemas productivos así como la calidad de vida de los habitantes. Sin embargo las previsiones apuntan a que en un futuro no muy lejano la disponibilidad de agua por habitante se verá reducida de manera considerable.

La sequía es un desastre natural, que causa importantes daños ambientales, sociales y económicos. Es un fenómeno cíclico y recurrente, de difícil predicción. Se manifiesta inicialmente por la disminución de precipitaciones, aunque en realidad es un evento mucho más complejo, puesto que otros factores climáticos (tales como altas temperaturas, altas presiones, baja humedad, etc.) están implicados, lo que causa una reducción de recursos hídricos aportados a los sistemas hidrológicos.

Muchas veces se suele tratar a la sequía como un evento raro y aleatorio que es impredecible, por lo que las Administraciones no suelen estar preparadas para responder eficaz y eficientemente cuando se presentan. Una respuesta efectiva a la sequía, requiere una planificación a largo plazo. Se deben desarrollar planes y políticas

de gestión tendientes a mitigar los impactos de las sequías en el corto plazo, y a disminuir la vulnerabilidad en el largo plazo. Debido a que a causa del cambio climático, las previsiones apuntan a que va a haber un acusado estrés hídrico, fundamentalmente en las cuencas del sureste. Los periodos de sequía intensa se incrementarán en intensidad y frecuencia. «Los ciclos de retorno, es decir, las sequías muy profundas podrían variar de los 100 años que nos dicen las estadísticas a periodos de una década», (Teresa Rivera, 2009, online)

Por otro lado el comportamiento espacial de las sequías no ha sido suficientemente investigado. La cobertura espacial de la intensidad y duración de la sequía es de gran importancia a la hora de planificar medidas para mitigar impactos de las mismas.



# **CAPITULO 2**

## **ANÁLISIS DE ANTECEDENTES**

### **2.1 DEFINICIÓN DE SEQUÍA**

No existe una definición universal de lo que es la sequía. De acuerdo a la opinión de Wilhite (1993), las definiciones de sequía deberían ser específicas de las distintas regiones y de sus impactos (económicos y sociales), ya que varían tanto espacial como temporalmente. Esta falta de definición objetiva y precisa de qué es la sequía, ha sido un obstáculo para el entendimiento de este evento extremo.

La sequía es la consecuencia de una reducción natural en la cantidad de precipitación recibida sobre un extenso período de tiempo, usualmente una estación o más en longitud, aunque otros factores climáticos (tales como altas temperaturas, elevados vientos y baja humedad relativa) son a menudo asociados con ella en muchas regiones del mundo y pueden significativamente agravar la severidad del evento.

No se debe confundir sequía (situación coyuntural) con escasez (situación permanente de déficit).

La sequía, entendida como anomalía temporal puede producir, o no, una situación de insuficiencia en los suministros de agua, en función del nivel de demanda de agua existente en el área y de las características, en general, de los sistemas de explotación del recurso.

La escasez representa una situación permanente de déficit en relación con la demandas de agua en un sistema de recursos de ámbito regional, caracterizado, bien por un clima árido o bien por un rápido crecimiento de las demandas consuntivas.

La sequía es una anomalía natural transitoria y debe diferenciarse de la aridez, que es una situación estructural natural de una región y por tanto permanente. Aún en estas circunstancias no debería haber déficit si los sistemas de explotación estuvieran adecuadamente diseñados y explotados y las demandas se mantuvieran en límites razonables, acordes con las características climáticas de la región. Ello precisa actuaciones planificadas a medio y largo plazo.

La severidad de la sequía no depende solo de la duración, intensidad y extensión geográfica de un episodio de sequía específico, sino también de las demandas de

recursos hídricos de una región requeridas por las actividades humanas y la vegetación. La importancia de una sequía no debería separarse de su contexto social. El impacto de una sequía depende fuertemente de la vulnerabilidad social en ese momento particular. Sequías subsecuentes en la misma región tendrán diferentes efectos, aún si son idénticas en intensidad, duración y características espaciales.

La sequía es un problema de especial importancia por diversas razones, una de ellas es que sus efectos a menudo se acumulan más lentamente sobre un período considerable de tiempo, e incluso pueden permanecer sus efectos por años después de concluido el evento, también porque la ausencia de una definición universalmente aceptada y precisa, aumenta la confusión sobre cuando existe o no una sequía, y si existe cuál es su grado de severidad y por último, que los impactos de las sequías son menos obvios y más amplios que los daños que pudieran causar otros riesgos naturales, por ello la cuantificación de sus impactos es una tarea difícil de realizar en comparación con otros riesgos naturales.

## **2.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS Y SEVERIDAD**

Las sequías difieren unas de otras acorde a tres características fundamentales (García, S.G., 2009):

- Intensidad
- Duración
- Distribución espacial

La intensidad se refiere al grado de disminución de la precipitación y/o a la severidad de los impactos asociados con esa disminución. Usualmente es medida a partir de la diferencia de algún índice climático respecto a su valor normal. Un índice muy simple, ampliamente utilizado, es el porcentaje de la precipitación normal. Se mide la diferencia entre la precipitación actual y el valor de la precipitación normal o media para un mes o un período de meses. Las diferencias obtenidas a partir de la precipitación actual, son comparadas con valores medios esperados a nivel mensual, estacional o anual. La principal dificultad radica en la selección del umbral, por debajo del cual la deficiencia en el valor de la precipitación define el comienzo de la sequía (usualmente 75% del valor normal). En la realidad, los umbrales son definidos arbitrariamente, aunque ellos deberían estar unidos al impacto. Algunos índices de

sequía ampliamente utilizados, definidos en detalle más adelante, son el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer, el Índice de Humedad del Cultivo, etc.

En cuanto a la duración, las sequías usualmente requieren un mínimo de 2-3 meses para considerarlas establecidas pero pueden extenderse a lo largo de varios años consecutivos. La magnitud de los impactos de la sequía está muy relacionada con el momento del comienzo de la disminución de la precipitación, su intensidad y duración del evento.

Las sequías también difieren en términos de sus características espaciales. En pequeños países puede ocurrir que todo el país se encuentre afectado por una sequía, puesto que son usualmente fenómenos regionales, que resultan de anomalías a gran escala en el patrón de circulación atmosférica que llegan a establecerse y persistir por períodos de meses, estaciones o mayores.

Desde el punto de vista de la planificación, las sequías presentan importantes implicaciones. Las naciones deberían conocer las probabilidades de que un evento de sequía afecte de forma simultánea a todas o a la gran parte de las principales áreas agrícolas, y basándose en esta información, desarrollar los correspondientes planes de contingencia.

## **2.3 IMPACTOS DE LAS SEQUÍAS**

Los impactos de las sequías varían espacial y temporalmente, dependiendo del contexto social en el que se presentan.

Los tipos de impactos de las sequías se pueden clasificar en (García, S.G., 2009):

- Directos
- Indirectos

A su vez, se les asigna un orden de propagación: primer orden, segundo orden, tercer orden. Los impactos de primer orden suelen ser de naturaleza biofísica, mientras que los impactos de mayor orden están usualmente asociados a valoraciones socioeconómicas y cambios a largo plazo.

La determinación precisa de los costos financieros de las sequías es una ardua tarea, debido a la combinación de una serie de factores:

- Amplitud geográfica del área afectada,
- Diversidad de grupos y sectores implicados, y

- Dificultades asociadas a la cuantificación de los daños ambientales y personales.

Los impactos se presentan en tres sectores,

- Económico
- Social
- Ambiental

Los impactos económicos son numerosos, y pueden consistir en:

- Pérdidas directas en los sectores agrícolas y otros relacionados con ellos incluyendo el sector forestal y de pesca,
- Pérdidas en recreación
- Pérdidas en transporte
- Pérdidas en energía, etc.
- Desempleo
- Incremento en los precios de los alimentos
- Cierre de fábricas
- Incremento del costo de nuevos o suplementarios desarrollos de recursos hídricos, etc.

Las pérdidas ambientales son el resultado de:

- Daños a especies animales y vegetales
- Daños al ecosistema
- Daños a la calidad del agua y del aire
- Actividad forestal y posible incremento de la presencia de fuegos
- Degradación de la calidad del paisaje
- Erosión del suelo

Los impactos sociales principalmente involucran:

- Seguridad pública
- Salud
- Conflictos entre usuarios del agua
- Pérdidas de vidas
- Desigualdades en la distribución de los programas de disminución de impactos y desastres
- Despoblación de zonas rurales
- Reducción de la calidad de vida, etc.

## 2.4 TIPOS DE SEQUÍAS

Como se ha comentado anteriormente, no existe una definición universal de sequía, debido a que la sequía afecta a diferentes sectores sociales y económicos, se presenta con una frecuencia que varía en casi todas las regiones del globo, por ello las distintas definiciones presentan diferencias regionales e incluso ideológicas.

Se pueden encontrar definiciones (García, S.G., 2009):

- Conceptuales
- Operacionales

Las definiciones conceptuales son genéricas en la descripción del fenómeno. Por ejemplo, una sequía según un diccionario podría considerarse un largo periodo sin precipitaciones, durante la estación de crecimiento.

Las definiciones operacionales intentan identificar el comienzo, frecuencia, severidad y duración de la sequía.

Existen muchas perspectivas disciplinarias de sequía. Cada disciplina incorpora diferentes factores, físicos, biológicos y/o socioeconómicos en su definición de sequía.

Wilhite y Glantz (1985) detectaron más de 150 definiciones de este tipo, diferenciándolas en cuatro grupos según el punto de vista científico desde el que sea analizado el fenómeno:

- Meteorológica
  - o Grado de sequedad
  - o Duración del periodo seco
- Hidrológica
- Agrícola
- Socio – Económica

### **Sequía meteorológica**

Este tipo de sequía está basada en datos climáticos, se expresa mediante la desviación de la precipitación respecto a la media durante un periodo de tiempo determinado. Ante la dificultad de establecer una duración y magnitud del déficit pluviométrico validas para diferentes áreas geográficas, algunas definiciones de sequía optan por no especificar umbrales fijos.

Por ejemplo, Palmer (1965) define sequía meteorológica como el «intervalo de tiempo, generalmente con una duración del orden de meses o años, durante el cual el aporte de humedad en un determinado lugar cae consistentemente por debajo de lo

climatológicamente esperado o del aporte de humedad climatológicamente apropiado», mientras que Russell *et al.* (1970) son mas concisos: «Falta prolongada de precipitación, inferior a la media».

Definiciones de sequía meteorológica deben ser consideradas como específicas de una región, debido a que las condiciones atmosféricas causantes de la deficiencia de precipitación son altamente variables desde una región a otra. Algunas definiciones diferencian sequía meteorológica sobre la base de un número de días con precipitaciones inferiores a un umbral determinado. Por ejemplo, en España, este tipo de sequía se define de la siguiente manera: «En las diferentes cuencas hidrográficas españolas pueden considerarse años secos aquellos cuya precipitación experimenta la siguiente reducción respecto a la media anual: Cantábrico, Duero y Ebro, 15-25%; Guadalquivir, 20-25%; Guadiana/Tajo, 30%; Levante y Sureste, 40-50%» (Olcina, 1994, online).

### **Sequía agrícola**

La sequía agrícola une distintas características de las sequías meteorológicas e hidrológicas a impactos agrícolas, centrándose en las disminuciones de precipitaciones, diferencias entre evapotranspiración real y potencial y déficit de humedad del suelo principalmente. La demanda hídrica de una planta depende de condiciones meteorológicas, características biológicas específicas de la planta, su etapa de crecimiento, y de propiedades físicas y biológicas del suelo. Una definición operacional de sequía agrícola debería considerar la susceptibilidad variable de los cultivos en sus distintas etapas de crecimiento.

### **Sequía hidrológica**

Las sequías hidrológicas están más relacionadas a los efectos de los períodos de disminución de precipitaciones sobre el suministro hídrico superficial y subsuperficial, que a los valores de las bajas precipitaciones.

Las sequías hidrológicas usualmente están desfasadas respecto a las sequías meteorológicas y agrícolas. La sequía meteorológica se presenta por una disminución en la cantidad de las precipitaciones. La sequía agrícola se debe principalmente al resultado de deficiencias en la humedad del suelo. Existe un lapso de tiempo entre las deficiencias en la cantidad de las precipitaciones, y su observación en las componentes del ciclo hidrológico. Por ello, existe un desfase entre las disminuciones de las precipitaciones y sus efectos en los sectores económicos y sociales.

La frecuencia y severidad de la sequía hidrológica es a menudo definida sobre la base de su influencia en las cuencas hidrográficas. Para ello, se estiman las frecuencias de flujos bajos para los distintos cauces. Si el flujo actual para un cierto período de tiempo seleccionado se encuentra por debajo de un determinado umbral, entonces se considera que la sequía hidrológica ha comenzado. Aunque el número de días y el nivel de probabilidad que debe ser excedido para considerar que existe una sequía meteorológica, es un tanto arbitrario. Además este criterio varía para cada cauce.

### **Sequía Socio-económica**

La sequía socio-económica asocia el suministro y demanda de algún bien económico o servicio con la sequía meteorológica, hidrológica y agrícola. Algunos autores indican que los procesos espaciales y temporales de suministro y demanda son dos procesos básicos que deberían ser incluidos en una definición objetiva de sequía. La sequía podría definirse que se presenta cuando la demanda excede el suministro como resultado de una deficiencia relacionada con el clima.

Los cuatro tipos de sequía analizados reflejan el proceso de evolución de la sequía, determinado tanto por la variabilidad natural del clima, como por la duración del evento, y por la interacción entre clima y sociedad.

## **2.5 GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN DE SEQUÍAS**

La gestión o administración de las sequías normalmente se refiere a decisiones y estudios de la información sobre sequía y predicciones, impactos, seguimiento, alerta y respuesta a la sequía (García, S.G., 2009).

Desarrollar una política de planificación a nivel nacional y regional constituye el primer paso, complicado pero esencial, hacia la reducción de la vulnerabilidad de la sociedad. La planificación de la sequía debe llevarse a cabo durante los períodos no secos para implementarlos durante la misma. Para que sea efectivo el proceso de planificación y desarrollo de programas de mitigación, debe involucrar a todos los departamentos relevantes del gobierno que de alguna manera estén implicadas en la misma.

Una vez concluido el período de crisis asociado a la sequía, el interés por ella disminuye rápidamente. El conocimiento y el pánico son rápidamente reemplazados por la apatía e indiferencia una vez que se presentan las precipitaciones, y las condiciones de sequía han desaparecido. Esta actitud dificulta la planificación frente a sequías, siendo sólo preocupante cuando ocurre un evento de la misma.

Según expone Kerang Le *et al.* (1993), el proceso de desarrollo de un plan de gestión y mitigación de sequías debe dirigirse hacia los siguientes puntos:

- Definición de un centro de gestión de sequías a nivel nacional, regional y provincial.
- Establecimiento de un sistema de evaluación de sequías. El objetivo es establecer índices de sequías para su seguimiento, estudio de sus variaciones espacio-temporales y causas que las motivaron, preparar análisis climatológicos regionales y representar la evaluación a tiempo real de los impactos en diferentes etapas del desarrollo de la sequía. Tal sistema debe ser capaz de adquirir datos e información, almacenarlos, visualizarlos, describir estadísticamente la sequía y presentar su distribución espacial. Todo ello debe ser enfocado desde una perspectiva multidisciplinar evaluando los distintos tipos de impactos.
- Organización e implementación de programas de respuesta y mitigación de la sequía.

Por otro lado, Wilhite (1993b) presenta una metodología para la planificación de la sequía que se puede simplificar en una serie de diez pasos:

- 1) Designación de una comisión nacional de sequía.
- 2) Exposición de los objetivos de la política y el plan sobre sequías.
- 3) Anulación y resolución de conflictos entre sectores ambientales y económicos.
- 4) Inventario de recursos naturales, biológicos y humanos y restricciones financieras y legales.
- 5) Desarrollo de un plan de sequía.
- 6) Identificación de las necesidades de investigación y falta de acción en algunas instituciones.
- 7) Síntesis de los resultados científicos y políticos.
- 8) Puesta en marcha de un plan de sequía.
- 9) Desarrollo de programas de educación y orientación a múltiples niveles.
- 10) Desarrollo de los procedimientos de evaluación del plan de sequía.

El desarrollo de una planificación ante sequías puede verse obstaculizada por diversas dificultades (Wilhite, 1993b). La principal es la falta de concienciación de los riesgos que presenta la sequía, por parte de políticos, técnicos y población en general. La falta de comunicación y cooperación entre científicos, y entre científicos y políticos también complica los esfuerzos para la iniciación de los pasos hacia la preparación. Por otro



lado, también supone dificultades los límites tecnológicos en predicción y detección de sequías, la insuficiencia de datos y las inadecuadas tecnologías de mitigación. Debido a la diversidad de sectores que se ven afectados por la sequía, la competencia de intereses y la rivalidad institucional ralentiza el desarrollo de respuestas frente a la sequía.

La planificación es un proceso dinámico que debe incorporar nuevas tecnologías y debe tener en cuenta las tendencias de los distintos sectores (socioeconómicos, agrícola, tecnológico y político) con el fin de mitigar y, en algunos casos, prevenir los impactos de la sequía.

Por último, hay que destacar que la principal dificultad que ha sido y seguirá siendo un impedimento en la planificación es su coste. Debido a la diversidad de grupos y sectores implicados en la sequía, a la amplitud geográfica del área afectada y a las dificultades asociadas a la cuantificación de los daños ambientales y personales, la determinación precisa de los costos financieros de las sequías es una ardua tarea (Wilhite, 1993a). Es difícil determinar los beneficios de una conveniente planificación. Los costes en la preparación son fijos y actuales mientras que los costes provocados por las sequías son inciertos y futuros. Además, este hecho se complica considerando que los costes de la sequía no son sólo económicos, debiendo entenderse también en términos de sufrimiento humano, daños en recursos biológicos y degradación del medioambiente. Tales efectos son difíciles de estimar y valorar.

## **2.6 INDICES DE SEQUÍA**

Para poder precisar las características de los eventos secos es necesario cuantificarlos numéricamente, cuyo valor refleje la severidad de la sequía. Los índices de sequía definen y describen las sequías.

Para determinar que un evento extremo de la naturaleza de los episodios de escasez pluviométrica se convierta en un riesgo natural, Burton *et al.* (1978) definen siete parámetros con los que definirla, uno independiente (magnitud), cuatro correspondientes al componente temporal (duración, frecuencia, velocidad de implantación y espaciamiento temporal), y dos al espacial (extensión, y dispersión espacial). Para cuantificar estos parámetros no es suficiente con medir el número de días de lluvia, sino que es necesario aplicar cálculos matemáticos con los que establecer detalladamente en qué medida ha habido déficit pluviométrico y cuáles son los límites temporales del episodio seco. (Marcos Valiente. O. 2009, online)

En referencia a la sequía meteorológica e hidrológica (según los trabajos de Dracup et al. (1980), y Martín-Vide (1998), respectivamente), cada parámetro puede definirse y ser medido de forma individualizada:

- La magnitud es el déficit medio de precipitación o caudal durante el periodo de duración del evento seco. Puede medirse como la anomalía (en porcentaje) o la diferencia (en valor absoluto) de precipitación o caudal para el período seleccionado. La duración es el tiempo (número total de días, meses o años consecutivos) durante el cual la precipitación o el caudal totales registrados son inferiores a la precipitación o el caudal medio de ese mismo período.
- La frecuencia es el número de casos que se producen durante un período determinado. Puede medirse también a través de la probabilidad empírica de que la precipitación o el caudal sean inferiores a la media, o del período de retorno del evento seco (intervalo medio de tiempo dentro del que puede esperarse que ocurra una sequía de determinada magnitud).
- La velocidad de implantación es el tiempo transcurrido entre el momento de inicio del déficit de precipitación o caudal, y el momento en que ese déficit alcanza su valor máximo.
- El espaciamiento temporal es el tiempo transcurrido entre diversos períodos secos, lo que nos proporciona una medida de la regularidad o aleatoriedad del fenómeno. Mediante este parámetro se obtiene una primera aproximación a la previsibilidad de la sequía.
- La extensión es la superficie total en la que se registra déficit hídrico.
- La dispersión espacial es la medida del grado de difusión o concentración de la anomalía de caudal o de precipitaciones.

Existe una amplia variedad de índices y ecuaciones dedicadas a caracterizar los eventos secos en sus dos parámetros más relevantes: magnitud (o severidad) y duración. Algunos de éstos son:

- Para **SEQUÍA METEOROLÓGICA**:

Porcentaje de la precipitación media

Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI)

Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

Índice de Humedad del Cultivo

Precipitación Efectiva (EP, Effective Precipitación)

Índice de Sequía (IS)

- Para **SEQUÍA HIDROLÓGICA:**

Índice de Sequía Hidrológica de Palmer (PHDI)

Índice del Suministro de Agua Superficial

Índice de severidad de la sequía (DSIs)

- Para **SEQUÍA AGRÍCOLA:**

Índice de sequía específico del cultivo (CSDI)

Índice de Humedad de Cultivo (CMI, Crop Moisture Index)

Datos satélite para seguimiento superficial de la sequía

- Para **SEQUÍA SOCIO-ECONÓMICA:**

Son numerosos los índices que existen para cuantificar sequías de tipo meteorológica, hidrológica y agrícola pero a la hora caracterizar las sequías socio-económicas, ninguno de los índices anteriores nos son de utilidad.

Actualmente la única referencia cuantitativa existente son las relaciones de pérdidas económicas, o el número de personas afectadas por restricciones de abastecimiento de agua y en casos extremos, el recuento de fallecidos.

Aunque esta información es muy válida y puede servir para caracterizar los sectores económicos y los grupos sociales más castigados por la sequía, existe una carencia metodológica en la determinación de la vulnerabilidad socioeconómica de una región a los episodios de falta de precipitación.

La vulnerabilidad de distintas sociedades o regiones a eventos negativos extremos está íntimamente ligada al nivel de desarrollo social y económico en el que éstas viven.

De modo que dos regiones distintas que sufran las mismas condiciones climáticas no afectarían de igual manera a una que a la otra, es por eso que los índices climáticos que han de utilizarse deben tener en cuenta el nivel de desarrollo económico de cada región estudiada.

Para obtener índices que caracterice sequías socio-económicas, lo lógico sería obtener una combinación de indicadores climáticos y socioeconómicos, adaptando en el tiempo los umbrales de referencia en función de la variación que registren las condiciones de respuesta de la sociedad y la economía de una región a los episodios de sequía.

## **2.7 LA SEQUÍA EN ESPAÑA**

España, debido a su posición geográfica, es un país especialmente afectado por las sequías. Echo fácilmente comprobable, ya que por ejemplo desde 1980 hasta el año

2000, más de la mitad de los años han sido catalogados como secos o muy secos. De éstos siete fueron en la década de los 80, cinco en la de los 90, etc. Debido a la alta variabilidad espacial de las precipitaciones en España (más de 1000 mm en el norte y menos de 300 mm en el sur) hace que unas zonas sean más vulnerables a la sequía que otras afectando especialmente a las regiones en las que la precipitación media anual suele ser inferior a los 600 mm.

Según el Libro Blanco del Agua las sequías más graves del período 1940/41 a 1995/96 se concentran en tres periodos: la de octubre de 1941 a septiembre de 1945, la de octubre de 1979 a septiembre 1983 y la de octubre de 1990 a septiembre de 1995, siendo esta última, con diferencia, la más aguda en intensidad.

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), antiguo Instituto Nacional de Meteorología (INM) ha comprobado que España ha iniciado desde noviembre de 2004 la sequía más severa desde que en 1947 se empezaran a recopilar los datos pluviométricos.

# CAPITULO 3

## MATERIAL Y MÉTODOS

### 3.1 PROYECTO ENSEMBLES

El proyecto ENSEMBLES es apoyado por el 6º Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Comisión Europea, como un Proyecto Integrado de 5 años de duración (2005-2009), bajo la sub-prioridad "Cambio Global y Ecosistemas".

El proyecto tiene por objeto (ENSEMBLES Project, 2009, online):

- Desarrollar un sistema basado en varios modelos para predicción del cambio climático. Considerando los principales datos disponibles actualmente, de alta resolución, a nivel mundial y regional del Sistema Terrestre desarrollados para Europa, y validado con un control de calidad para la cuadrícula de datos de alta resolución de Europa, para producir por primera vez, una estimación probabilista de la incertidumbre en el futuro del clima estacional para décadas y escalas más grandes de tiempo.
- Cuantificar y reducir la incertidumbre en la representación de la física, la química y la biología, relacionados con el Sistema Terrestre (incluidos los recursos hídricos, el uso de la tierra, la calidad del aire y el ciclo del carbono).
- Maximizar la explotación de los resultados, vinculando las salidas de los modelos de predicción a una serie de aplicaciones, como la agricultura, la salud, la seguridad alimentaria, energía, recursos hídricos, los seguros y la gestión de los riesgos meteorológicos.

Las líneas de investigación del proyecto ENSEMBLES son las siguientes (Fig. 3.1):

RT0 – Proyecto de Integración, gestión y promoción.

RT1 – Desarrollo de los sistemas de predicción.

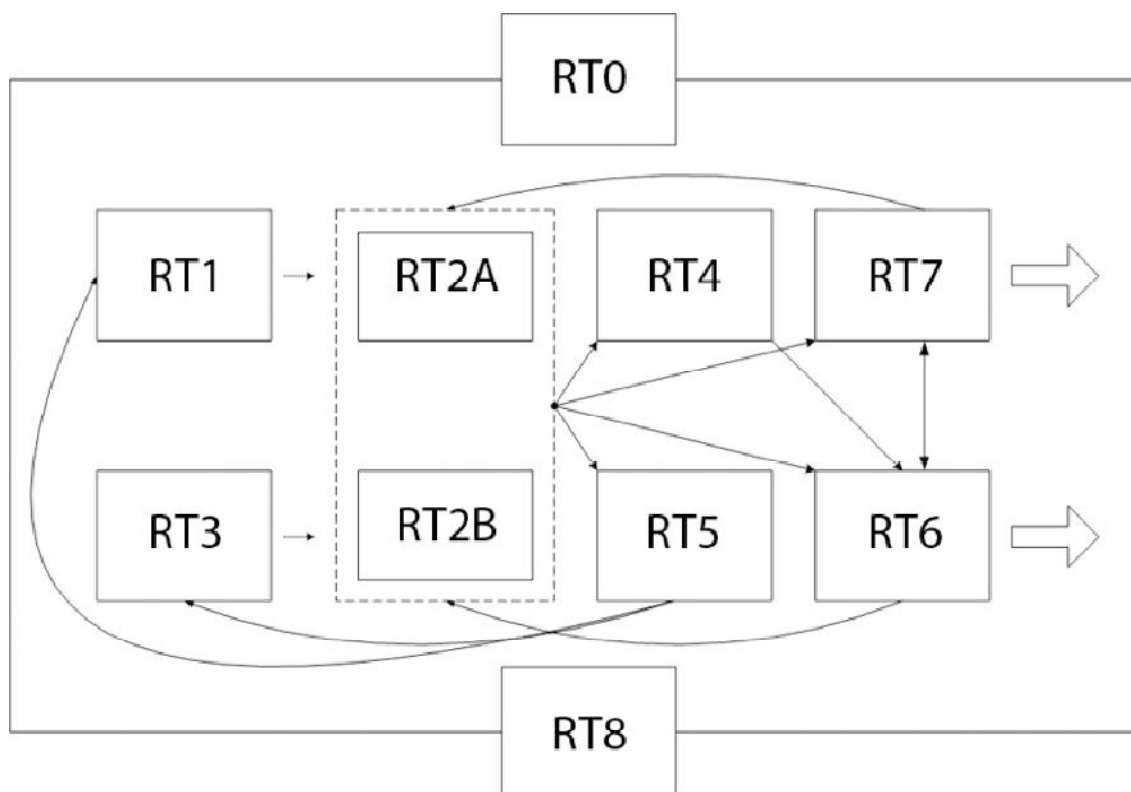
RT2A – Producción de las series de simulación del clima y los escenarios de cambio climático.

RT2B – Producción de Escenarios Climáticos Regionales para las evaluaciones de impacto.

RT3 – Formulación de alta resolución de Modelos Climáticos Regionales para Europa.

RT4 – Comprensión del proceso del cambio y variabilidad del clima.

Estas líneas de investigación y las conexiones entre ellas se pueden representar de la siguiente forma:



Con anterioridad al proyecto ENSEMBLES ya se desarrolló el proyecto PRUDENCE: un proyecto que busca reducir al mínimo las incertidumbres en la evaluación de los impactos del cambio climático en la agricultura en las zonas del Mediterráneo (PRUDENCE online)

Los Modelos Climáticos utilizados bajo el presente ENSEMBLES, son los siguientes:

- |            |               |             |          |
|------------|---------------|-------------|----------|
| - RCA3     | - Aladin      | - HIRHAM    | - CLM    |
| - HadRM3Q0 | - HadRM3Q3    | - HadRM3Q16 | - RegCM  |
| - RCA3     | - RACMO       | - RACMO v1  | - HIRHAM |
| - REMO     | - RCA         | - PROMES    | - CRCM   |
| - GEMLAM   | - DMI-HIRHAM5 | - RRCM      |          |

Los datos de los que se parte en este proyecto final de carrera son los resultados de precipitación diaria y mensual de las líneas RT2B y RT3, líneas de investigación complementarios para una evaluación completa de los Modelos Climáticos Regionales. Y de todos los modelos generados por ENSEMBLES, sólo evalúo los tres siguientes: HIRHAM, RCA y RegCM, de los cuales se presenta más información en las tablas 3.1 y 3.2.

*Tabla 3.1*

RT2B					
Instituto	Escenario	Forzamiento con Modelo Climático Global	Modelo	Resolución	Acrónimo
DMI	A1B	ARPEGE	HIRHAM	25 Km	DMI- HIRHAM5
SMHI	A1B	ECHAM5	RCA	25 Km	SMHIRCA
ICTP	A1B	ECHAM5	RegCM	25 Km	ICTP- REGCM3

*Tabla 3.2*

RT3			
Instituto	Modelo	Resolución	Acrónimo
DMI	HIRHAM	25 Km	DMI-HIRHAM
SMHI	RCA	25 Km	SMHIRCA
ICTP	RegCM	25 Km	ICTP-REGCM3

### 3.2.1 ESCENARIOS DEL IE-EE

Las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de muy complejos sistemas dinámicos, determinado por fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socio-económico o el cambio tecnológico. Su evolución futura es muy incierta.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) fue creado conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), con el fin de evaluar los aspectos científicos, los efectos y los aspectos socio-económicos del cambio climático y de las opciones de mitigación y adaptación. En respuesta a una evaluación de los

anteriores escenarios de emisiones IS92 del IPCC, realizada en 1994, la reunión plenaria de 1996 del IPCC solicitó un Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE).

Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. La posibilidad de que en la realidad las emisiones evolucionen tal como se describe en alguno de estos escenarios es muy remota. Un escenario contiene necesariamente elementos subjetivos, y se presta a interpretaciones diversas. Para describir de manera coherente las relaciones entre las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución, y para añadir un contexto a la cuantificación de los escenarios, se desarrollaron cuatro líneas evolutivas diferentes (Fig.3.2). Cada una de ellas representa un cambio (o tendencia) demográfico, social, económico, tecnológico y medioambiental, que algunos pueden valorar positivamente, y otros, negativamente.

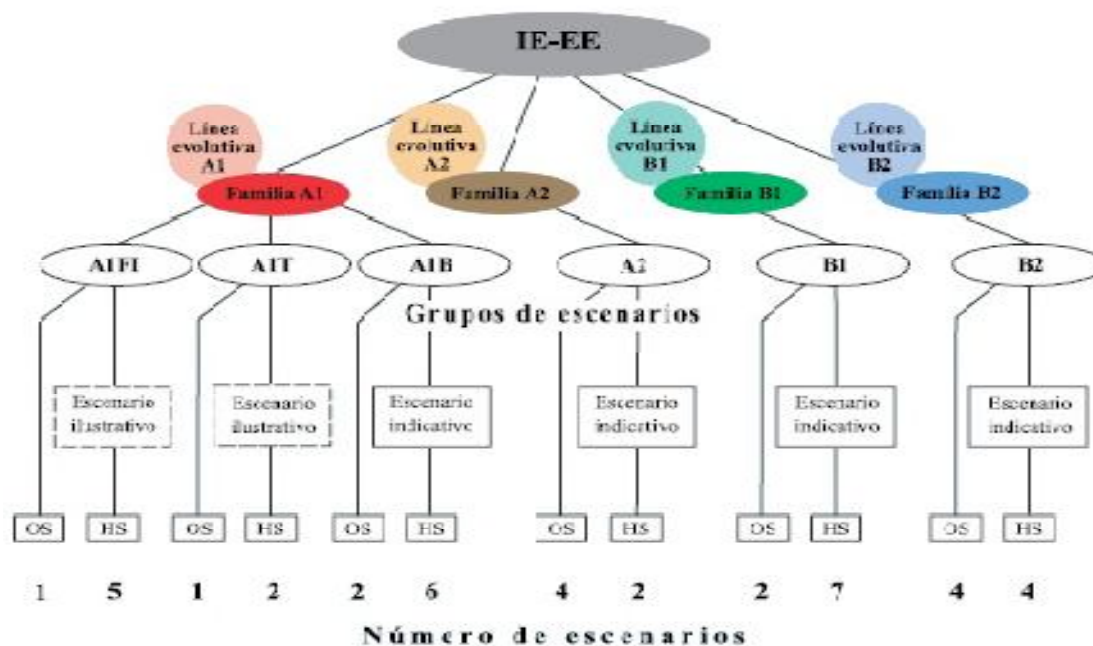


Fig. 3.2. Ilustración esquemática de los escenarios IE-EE

(Desarrollo Sostenible, 2009, online)

Cuatro líneas evolutivas cualitativas proporcionan cuatro conjuntos de escenarios denominados "familias": A1, A2, B1 y B2. En total, seis equipos de modelizadores han desarrollado 40 escenarios IE-EE. Todos ellos son igualmente válidos, y no tienen



asignadas probabilidades de hacerse realidad. Dentro de cada familia y grupo de escenarios, algunos de ellos comparten supuestos “armonizados” sobre la población mundial, el producto interior bruto y la energía final. Éstos están marcados con los grupos de letras “HS”, en el caso de los escenarios armonizados, y con “OS” para los escenarios que exploran las incertidumbres asociadas a las fuerzas determinantes más allá de los escenarios armonizados. Se indica también el número de escenarios desarrollados en cada categoría.

- La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B).
- La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- La familia de líneas evolutivas y escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un

aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

- La familia de líneas evolutivas y escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

### **3.2.2 PERÍODOS DE ANÁLISIS**

Como se ha comentado, los datos de los que parte este proyecto son los resultados de las líneas de investigación RT2B y RT3 del proyecto europeo ENSEMBLES. Estos datos contienen variables estudiadas entre los años 1960 y 2000, que se completan con una proyección de las mismas hasta el 2050. Algunos Institutos que colaboran en el proyecto han aumentado el rango de estudio desde el año 1950 hasta una proyección al 2100, como es el caso de los tres modelos que se utilizan en este PFC. Por lo que se ha decidido en el presente PFC utilizar un intervalo común para los tres RCMs analizados, que comprende de 1961 a 2080. Se han considerado cuatro períodos iguales a 30 años (1961-1990, 1991-2020, 2021-2050, 2051-208), con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos (tanto de precipitación media anual como de longitud y ocurrencia de rachas secas). Pudiendo contrastar también los resultados del período 1961-1990 con datos reales de precipitación.

### **3.3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

La zona de estudio de este PFC es la Península Ibérica, centrándose en el análisis más profundo en España excluyendo los dos archipiélagos, Ceuta y Melilla.

España tiene un clima muy diverso a lo largo de todo su territorio. Predomina el carácter mediterráneo en casi toda su geografía. Las costas del sur y mediterráneas tienen un clima denominado mediterráneo de costa que también posee el Valle

del Guadalquivir: temperaturas suaves, precipitaciones abundantes casi todo el año excepto en verano.

A medida que nos adentramos en el interior el clima es más extremo, nos encontramos con el clima mediterráneo continental, que abarca casi toda la Península, temperaturas bajas en invierno, altas en verano y precipitaciones irregulares (dependiendo de la posición geográfica). Por lo general, las comunidades occidentales reciben más precipitaciones que las orientales. Así pues, Galicia y el Cantábrico poseen un clima oceánico, caracterizado por la abundancia de precipitaciones durante todo el año especialmente en invierno, y unas temperaturas frescas.

El clima de montaña se puede observar en altitudes altas, Cordillera Cantábrica, Pirineos, altos puntos de la C. Ibérica, Sistema Central y Cordilleras Béticas, donde se dan temperaturas bajas (inviernos fríos o muy fríos) y precipitaciones generalmente abundantes.

Los climas áridos o semiáridos (menos de 300 mm anuales) los encontramos en ciertos puntos peninsulares del este: Almería (famoso el desierto de Tabernas) o el Cabo de Gata (donde se registran menos de 200 mm anuales), Granada (Guadix), Murcia, Alicante y Valle del Ebro donde el efecto foehn es el principal causante de tan bajas precipitaciones.

El carácter subtropical es característico de las Islas Canarias, con unas temperaturas cálidas durante todo el año y pocas precipitaciones (más abundantes en las islas occidentales). Sin embargo, este clima también se da en las costas sureñas de la península (Málaga, Granada, Almería), donde tienen temperaturas relativamente suaves durante todo el año, aunque las precipitaciones son algo más abundantes que en Canarias.

### **3.4 INTRODUCCIÓN AL SIG GRASS**

Los principales análisis se han realizado con el Sistema de Información Geográfica (SIG) GRASS (Geographic Resources Analysis Support System). GRASS es un software de distribución libre, que puede soportar información tanto ráster como vectorial y posee herramientas de procesamiento digital de imágenes.

En sus inicios, en 1982, el software fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Laboratorio de Investigación de Ingeniería de la Construcción del Ejército de los Estados Unidos (USA-CERL) como herramienta para la supervisión y gestión

medioambiental de los territorios bajo administración del Departamento de Defensa al no encontrar ningún SIG en el mercado que satisficiera estas necesidades. En 1991 se pone a disposición pública a través de Internet. Su popularidad se incrementa en universidades, empresas y agencias gubernamentales. En 1997, ante el anuncio de USA-CERL GRASS de que dejaría de dar soporte al programa, la Universidad de Baylor se hace cargo de su desarrollo. A partir de esta fecha aumenta su aceptación dentro del mundo académico. El 26 de octubre de 1999 con la versión 5.0 se libera el código del programa bajo licencia GNU GPL. GRASS era uno de los primeros ocho proyectos de la Fundación OSGeo.

GRASS está disponible principalmente para plataformas UNIX (Linux), aunque existe un proyecto paralelo denominado winGRASS GIS que ha portado el programa a versiones basadas en la tecnología NT del sistema operativo Microsoft Windows (Windows NT, Windows 2000, Windows XP, etc.) usando las librerías Cygwin, emulando así un entorno Unix dentro de Windows. Todo ello con un código idéntico al de la versión Unix/Linux.

### **El sistema operativo GNU/Linux**

Como se ha comentado, GRASS se puede usar bajo el sistema operativo Microsoft Windows, pero se ha decidido en el presente PFC usar un entorno Linux (clon de Unix) por varias razones:

- Un emulador de Unix no será nunca tan potente como un sistema Unix.
- Si se trabaja con programas de código abierto, la facilidad de comunicación entre programas se incrementa enormemente mejorando la capacidad de un SIG basado en GRASS.

## **3.5 ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN**

### **Adquisición de datos**

Los datos de las líneas de investigación RT2B y RT3 de ENSEMBLES son muy variados, entre ellos precipitación, temperatura, humedad, radiación solar, etc. En este caso solamente se han analizado los datos de precipitación.

Se ha trabajado con archivos comprimidos datos de precipitación diaria de diez años de longitud. Los datos analizados son los correspondientes al escenario del IE-EE A1B, y con una resolución de 25 Km.

También se dispone de mallas de precipitación diaria para Europa interpoladas desde estaciones pluviométricas, correspondientes al período 1950-2006. Estas nuevas bases

de datos para Europa (tanto de precipitaciones como de temperaturas diarias) han sido desarrolladas bajo ENSEMBLES para análisis climáticos, validación de modelos climáticos, downscaling y validación de modelos de impactos.

### **Estructura de la Base de datos en GRASS creada para el PFC**

Este PFC corresponde al inicio de una Línea de Investigación en análisis de RCMs para Europa, del Grupo de I+D de Gestión de Recursos Hídricos de la Universidad Politécnica de Cartagena, por lo que se ha llevado especial cuidado en crear una base de datos ordenada y fácil de utilizar para su posterior explotación.

La estructura de la base de datos de GRASS, se organiza en LOCATIONs y MAPSETs. Bajo la LOCATION llamada EUROPA\_GEO se han creado todos los MAPSETs referidos a cada modelo. La nomenclatura de los ficheros corresponde a modelo de forzamiento global (forzados con datos reales (RT3) o modelados (RT2B)), Instituto responsable de esos datos y rango temporal de información, quedando de esta manera:

(MODELO\_FORZAMIENTO\_INSTITUTO\_PERÍODO). Los modelos que están forzados con valores reales del reanálisis (correspondientes a la línea de investigación RT3) del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF) presentan el mismo modelo de forzamiento global (ERA-40).

De ésta manera, los MAPSETs creados para cada modelo se han ordenado según se presenta en la *Tabla 3.3*

*Tabla 3.3 MAPSETs creados para cada Modelo analizado.*

<b>MODELO</b>	<b>L. INVESTIGACIÓN</b>	<b>E. TEMPORAL</b>	<b>NOMBRE DEL MAPSET</b>
RCA	RT2B	DIARIA	RCA_ECHAM5_SMHI_19512000
RCA	RT2B	DIARIA	RCA_ECHAM5_SMHI_20012050
RCA	RT2B	DIARIA	RCA_ECHAM5_SMHI_20512100
RCA	RT2B	MENSUAL	RCA_ECHAM5_SMHI_MM
RCA	RT3	DIARIA	RCA_ERA40_SMHI_19612000
RCA	RT3	MENSUAL	RCA_ERA40_SMHI_MM
HIRHAM	RT2B	DIARIA	HIRHAM_ARPEGE_DMI19512000
HIRHAM	RT2B	DIARIA	HIRHAM_ARPEGE_DMI20012050
HIRHAM	RT2B	DIARIA	HIRHAM_ARPEGE_DMI20512100
HIRHAM	RT2B	MENSUAL	HIRHAM_ARPEGE_DMI_MM
HIRHAM	RT3	DIARIA	HIRHAM_ERA40_DMI_19582000
HIRHAM	RT3	MENSUAL	HIRHAM_ERA40_DMI_MM

RegCM	RT2B	DIARIA	REGCM_ECHAM5_ICTP19512000
RegCM	RT2B	DIARIA	REGCM_ECHAM5_ICTP20012050
RegCM	RT2B	DIARIA	REGCM_ECHAM5_ICTP20512100
RegCM	RT2B	MENSUAL	REGCM_ECHAM5_ICTP_MM
RegCM	RT3	DIARIA	REGCM_ERA40_ICTP_19612000
RegCM	RT3	MENSUAL	REGCM_ERA40_ICTP_MM

Además de estos MAPSETs en los que se encuentran los datos de precipitación de partida, se han creado otros seis MAPSETs para almacenar en ellos los resultados de los análisis según la *Tabla 3.4* siguiente.

*Tabla 3.4 MAPSETs creados para almacenamiento de resultados*

MODELO	L. INVESTIGACIÓN	NOMBRE DEL MAPSET
RCA	RT2B	RCA_RT2B_SEQUIAS
RCA	RT3	RCA_RT3_SEQUIAS
HIRHAM	RT2B	HIRHAM_RT2B_SEQUIAS
HIRHAM	RT3	HIRHAM_RT3_SEQUIAS
RegCM	RT2B	REGCM_RT2B_SEQUIAS
RegCM	RT3	REGCM_RT3_SEQUIAS

Por último, se han creado otros dos MAPSETs relacionados con los datos reales de precipitación del período 1950-2006. Los dos MAPSETs creados corresponden a PREC\_1950-2006 que contienen los datos de partida, y REALES\_SEQUIAS donde se almacenan los resultados de los análisis.

### **Importación de datos a GRASS**

Los archivos descomprimidos se encuentran en formato NetCDF (Network Common Data Format, con extensión .nc). Este formato de intercambio de información ha sido creado por la compañía UNIDATA como un formato estándar, para su uso en algunos de los softwares que ofrece a la comunidad científica. La característica de este formato es que contiene la suficiente información para poder conocer qué clase de datos se encuentran en el archivo (tipo de variable, unidades, dimensiones, institución que la creó, etc.), a diferencia de otros formatos que necesitan de un archivo adicional para su correcta interpretación. También se puede contar como otra de sus características

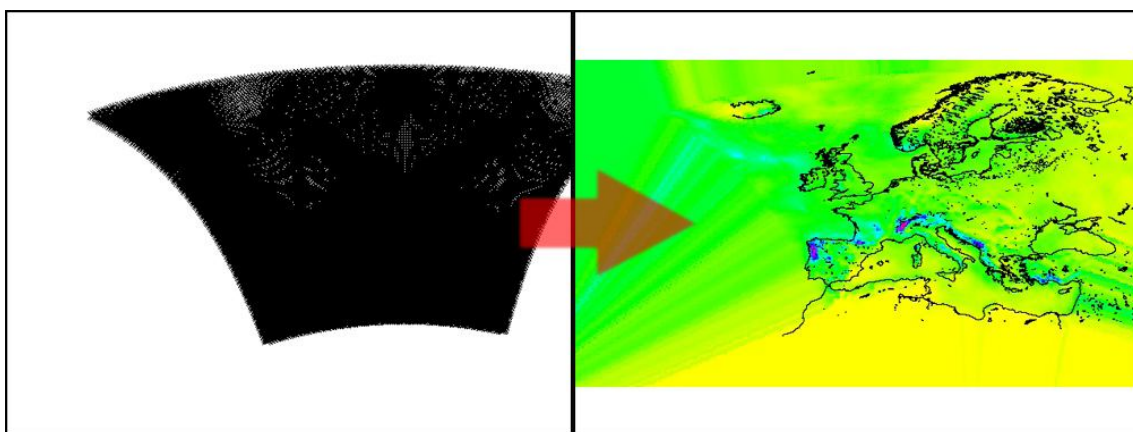
la portabilidad de su formato, es decir, que puede ser manipulado por cualquier ordenador que disponga de las librerías NetCDF instaladas en su disco duro.

Como la finalidad ha sido trabajar con el SIG GRASS para aprovechar su potencial en análisis raster, se ha extraído la información que contenían los archivos y se ha procedido a su importación al SIG. Para ello se ha utilizado el programa de libre distribución "cdf2c", que transforma la información a un archivo de texto con la sintaxis del lenguaje de programación C. Así se tiene libertad para trabajar con su contenido, y la forma más rápida para importar fue convertir cada día de precipitación que incluye los archivos NetCDF a archivos ASCII, y con el comando *r.in.ascii* de GRASS se han importado al SIG.

Pero el proceso de convertir la información a formato ASCII no fue sencillo. Se ha programado en lenguaje C para trabajar con los archivos NetCDF, además de modificar algunos parámetros del informe de salida del programa cdf2c. Por rapidez en la programación, se ha generado un código fuente que se ha modificado cada vez que se han utilizado los archivos de diferentes RCMs, debido a que no ha existido homogeneidad entre ellos en la extensión de la región que cubrían, ni en el período temporal. Los códigos generados se han denominado *r.in.rca*, *r.in.hirham* y *r.in.regcm*, cuya finalidad es la importación de los correspondientes archivos ASCII de los modelos RCA, HIRHAM y RegCM, respectivamente.

Una vez generados los archivos ASCII de valores diarios de precipitación en toda Europa, con un sencillo script se importan a GRASS, y se interpola cada punto del mapa con el método de Inverso de la Distancia al Cuadrado (comando *v.surf.idw*), de modo de generar un ráster. El script generado se presenta a continuación:

```
cd $HOME/RCA/RT2B/DM/ascii
for i in * do
v.in.ascii -z input=$i output=temp format=point fs='\t'
skip=0 x=1 y=2 z=3 cat=0 --overwrite
v.surf.idw input=temp output=$i layer=0 npoints=1
done
```



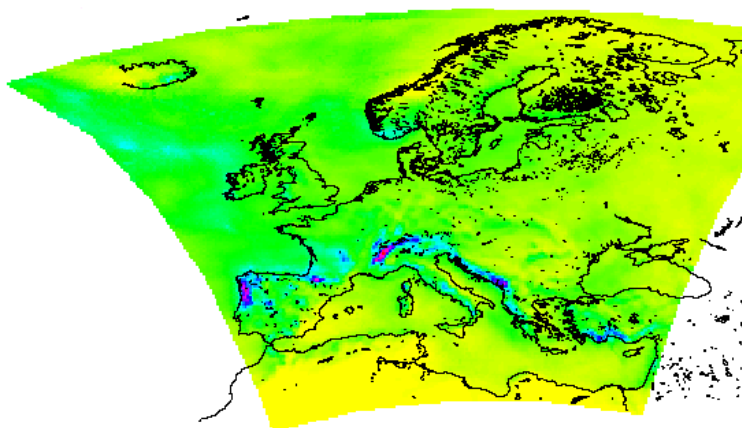
*Fig. 3.3 A la izquierda: mapa de puntos que genera v.in.ascii.*

*A la derecha: mapa resultante de la interpolación con v.surf.idw y la superposición de una capa con la línea de costa de Europa*

Como se puede comprobar en la *Figura 3.3*, al interpolar se tiene en cuenta todo el espacio de la región definida en GRASS. Ello conlleva que la orden *v.surf.idw* tiene que calcular píxeles que no hacen falta, así que para ahorrar tiempo en el procesamiento, se activa una máscara en GRASS que restringe sus operaciones.

Para generar esta máscara se ha usado el comando *v.digit* de GRASS, un sistema de menús altamente interactivo para desarrollar mapas. Este comando posee órdenes para digitalizar, editar, etiquetar, etc. de forma vectorial y también convierte datos vectoriales a formato ráster de GRASS. Con un mapa de puntos generado al importar cualquier ASCII, se puede definir en *v.digit* como imagen de fondo, y en base a ella construir un contorno mediante líneas, que luego se transforma a mapa raster. Esta máscara-raster se activa con la orden *r.mapcalc MASK="raster-mascara"*.

De esta forma, después de activar la máscara, la interpolación resultado queda como se observa en la siguiente *Figura 3.4*:



*Fig. 3.4. Mapa raster después de interpolar con una máscara activa*



### 3.6 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA

Una vez importados los datos a GRASS, es necesario realizar una comprobación de que la información es correcta. La importancia de esta comprobación se debe a que la calidad de los resultados que se obtengan del análisis, está en función de la calidad de los datos importados. Luego, la información importada será posteriormente explotada en aplicaciones futuras (no solo serán utilizados para este proyecto). Se presentaron algunas incidencias en la importación. La mayoría fueron problemas insignificantes, como por ejemplo días puntuales que por algún error desconocido no se importaron, o se importaron en blanco, error que se solucionó fácilmente importando de nuevo el día faltante. De los problemas que se presentaron, tal vez el más importante es el que se explica a continuación.

#### - ***Interpolación deficiente***

El primer error que se detectó en la importación, fue que la misma no se había producido por completo. El proceso dejó píxeles en blanco, nulos, que se repartían en mayor medida por la zona superior de la región, y disminuyendo por la zona inferior en forma de abanico, al igual que el límite del modelo regional.

Una hipótesis que podría explicar este error se basa en que la orden de interpolar que se utilizó en GRASS fue la del Método del Inverso de la Distancia al Cuadrado, y esta distancia se mantiene constante en todo el mapa, y al extenderse la región en forma de abanico, la zona superior queda con menos densidad de información y en algunos píxeles el programa no cuenta con el suficiente número de puntos para interpolar correctamente. Esta es la hipótesis más plausible, aunque no explica porqué este error no se presentó en todos los mapas, sino en algunos meses del año.

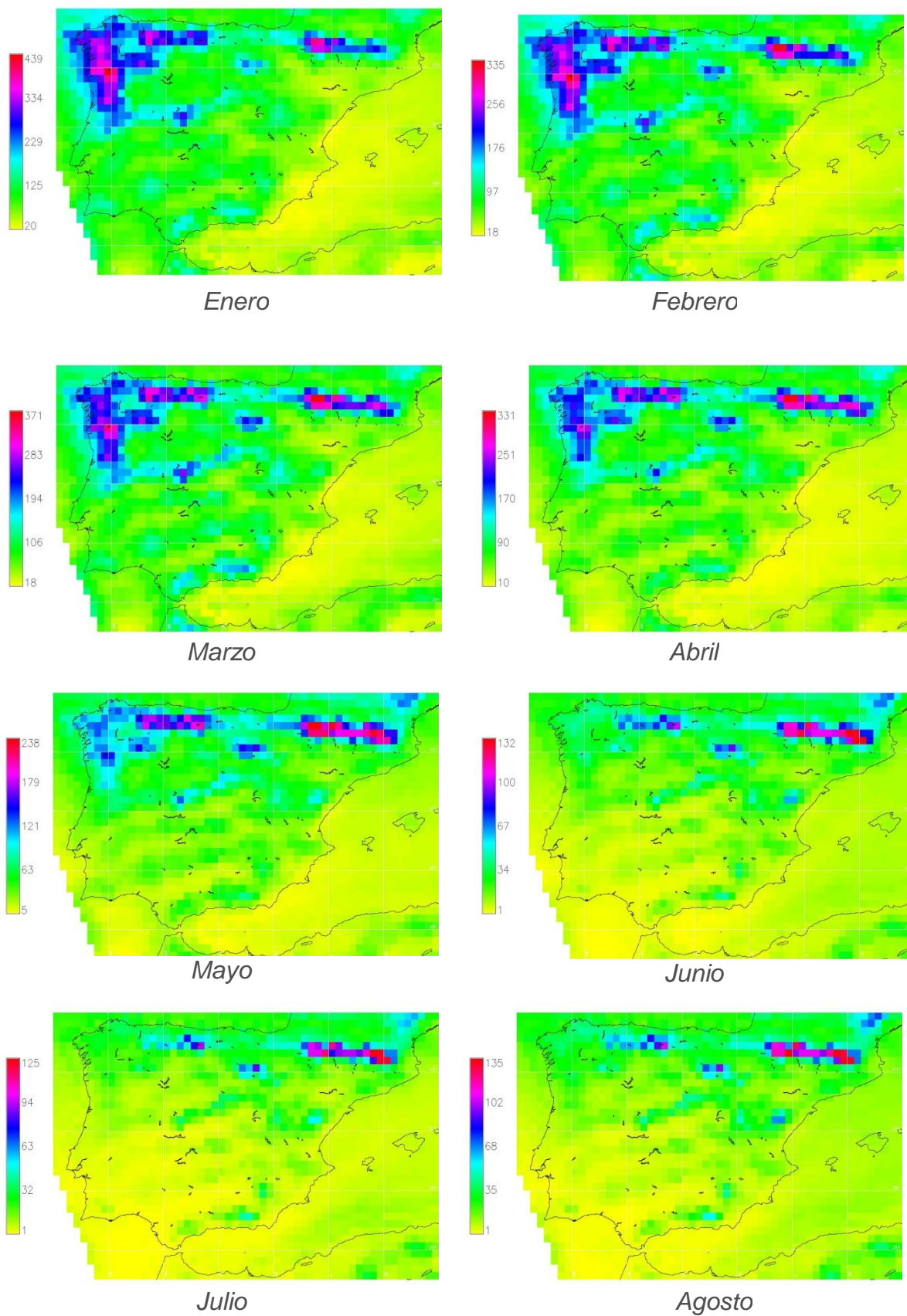
Este error tenía también una característica común en todos los mapas, y es que los píxeles nulos sólo pertenecían a regiones del mapa sin precipitación, quedando las zonas con algún valor de precipitación bien definidas y exentas de valores nulos.

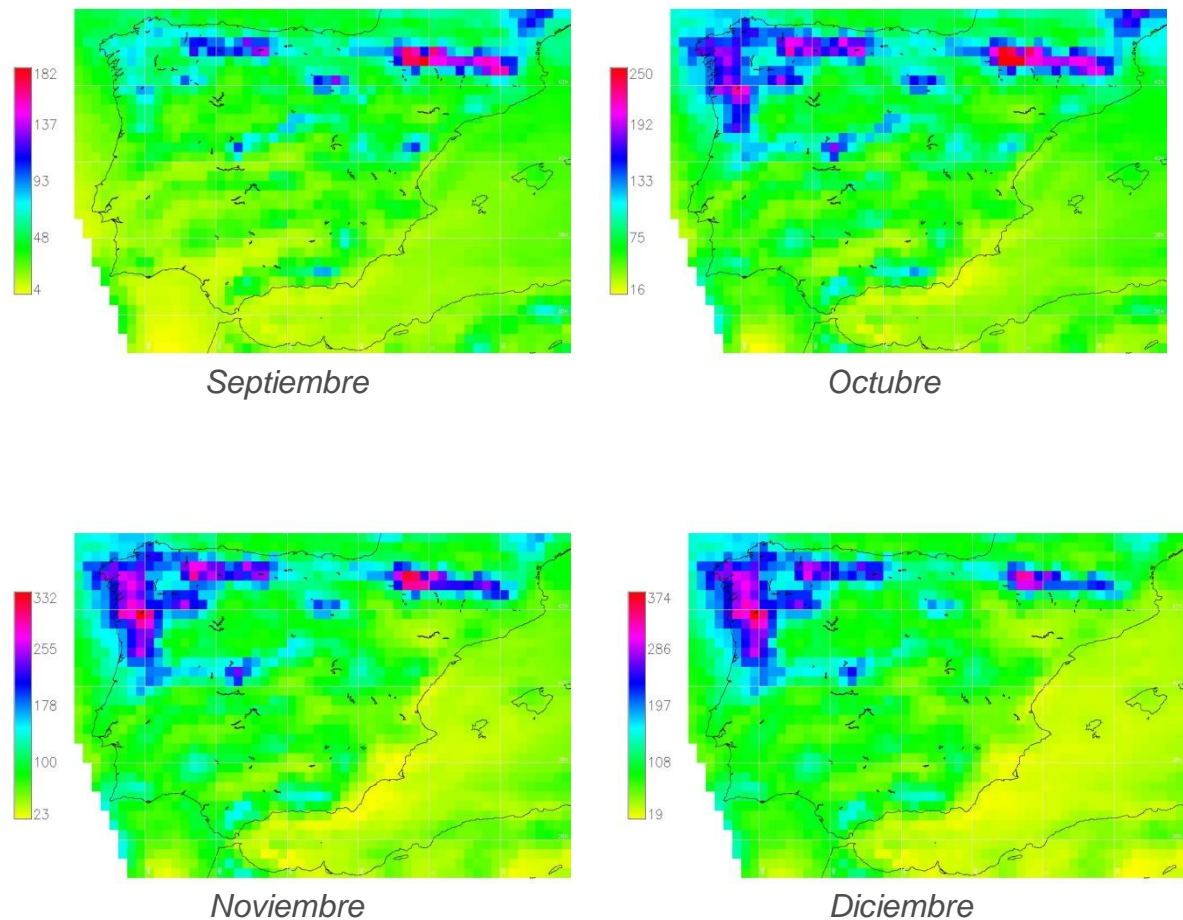
El problema se solucionó fácilmente ordenando a GRASS otra interpolación sobre los mapas, y como la orden sólo se ejecuta en los píxeles nulos, se completaron los huecos.

#### - ***Verificación final***

Por último, para comprobar que no existe ningún mapa defectuoso (con píxeles en blanco o con algún otro problema), se generó para cada década importada un mapa de precipitación media diaria, y para los paquetes de datos de escala temporal mensual, un mapa de precipitación media mensual.

A modo de ejemplo, en la *Figura 3.5* siguiente se presentan los mapas de precipitación media mensual para los datos de la línea de investigación RT2B del modelo **RCA**.





*Fig. 3.5. Precipitación media mensual. RT2B\_RCA*

### 3.7 DESARROLLO DEL ANÁLISIS EN GRASS Y EN R

Las variables que se estudian en este PFC son:

- Rachas secas
- Precipitación Media Anual (PMA)

#### 3.7.1 Rachas secas

Los estudios sobre las rachas secas y húmedas han proliferado en España desde la pasada década de los 80, centrándose especialmente en la mitad oriental de la Península. Las rachas secas suponen uno de los hechos climáticos definidores del ámbito mediterráneo, teniendo lógicamente una mayor incidencia en las zonas donde menos llueve. La repercusión de las mismas es notable en el funcionamiento de muchos ecosistemas al afectar directamente a la disponibilidad de un recurso tan básico como es el agua.

Es habitual que se confundan los términos sequía y racha seca, atribuyéndoles a ambos un significado similar. El concepto de sequía responde a una situación prolongada en el tiempo de falta de precipitaciones, debido principalmente a una persistencia de situaciones infrecuentes.

La sequía en muchos casos puede verse intensificada por la confluencia de elementos naturales (temperaturas y evapotranspiración elevadas), la deforestación y la degradación del suelo.

La definición de racha seca puede variar según el planteamiento metodológico de cada estudio. De forma general, se trata de un período caracterizado por la consecución de un determinado número de días sin precipitación apreciable ( $\leq 1\text{mm}$ , por ejemplo).

Este planteamiento del problema invita, por tanto, a considerar la delimitación de los períodos de rachas secas atendiendo a otros umbrales de precipitación en la definición de un día seco. Experimentos de simulación de lluvia, indican que el frente de humedad sobrepasa el límite de los primeros 5 cm del suelo a partir de 10mm de lluvia. Con precipitaciones inferiores, el agua permanecerá en la superficie del suelo o en su cubierta vegetal, desde donde fácilmente retorna a la atmósfera por evapotranspiración. Con este carácter aplicado, será interesante también la caracterización de las rachas secas considerando día seco aquel con una precipitación menor a 10 mm, ya que son estas precipitaciones las que realmente inciden sobre el balance de agua en el perfil del suelo.

### **Metodología de evaluación de rachas secas**

Para la evaluación de rachas secas, se han calculado para los cuatro períodos homogéneos de 30 años (datos de la línea de investigación RT2B) y para el período 1961-1990 (datos de la línea de investigación RT3 y datos reales de precipitación) los mapas de media de los logaritmos, máximos, media, desviación típica y número total de rachas con una longitud de un día para valores de precipitación inferiores a 1 y 10 mm, obteniendo así 40 mapas para cada modelo en la línea de investigación RT2B, 10 mapas para los de la línea RT3 y otros 10 para los datos reales de precipitación. En todos los casos, se han derivado bajo el SIG GRASS.

A modo de ejemplo, el comando utilizado para derivar este tipo de mapas para los datos de la línea de investigación RT2B sería:



```

method=( 'logmean' 'max' 'mean' 'stdev' 'total' )
lengthspell=( 0001 )
temporada=( 19611990 19912020 20212050 20512080 )
var=( 01 10 )
r.series.spell textfile="archivo_entrada" output="nombre del archivo de salida"
method="method" minspell="lengthspell" maxspell="máxima longitud de racha"
minvar="precipitación mínima" maxvar="var"

```

Donde el significado de cada variable es el siguiente:

- "method" define el método a utilizar para calcular el mapa
- "lengthspell" la mínima longitud de racha considerada
- "temporada" las cuatro temporadas objeto de estudio
- "var" umbral mínimo de precipitación apreciable

Los archivos de entrada corresponden a ficheros que contienen la serie de los mapas a analizar (mapas de precipitación diaria)

Así por ejemplo, los diez mapas que han salido para el modelo **HIRHAM** en la línea de investigación **RT3** se presentan en las figuras siguientes:

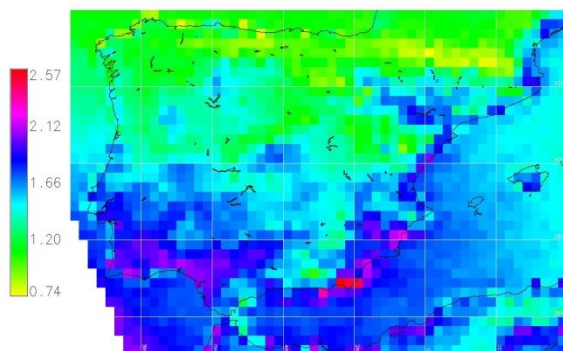


Fig. 3.6. logmean\_19611990\_minspell0001\_maxv01

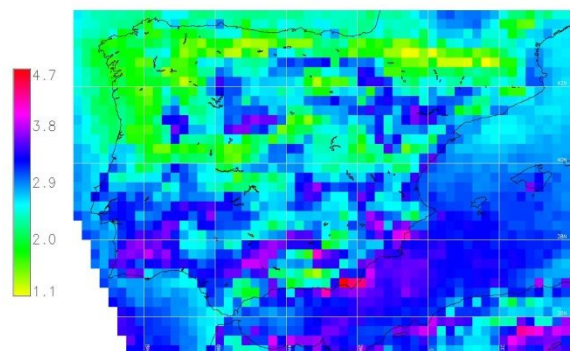


Fig. 3.7. logmean\_19611990\_minspell0001\_maxv10

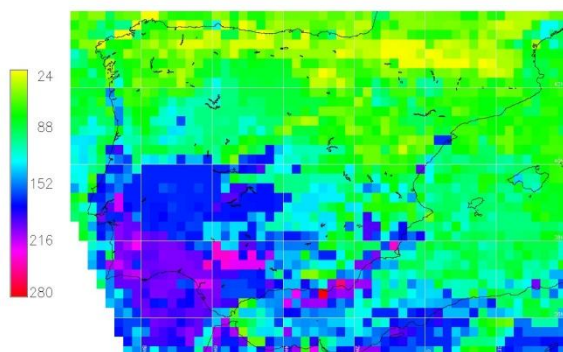


Fig. 3.8. max\_19611990\_minspell0001\_maxv01

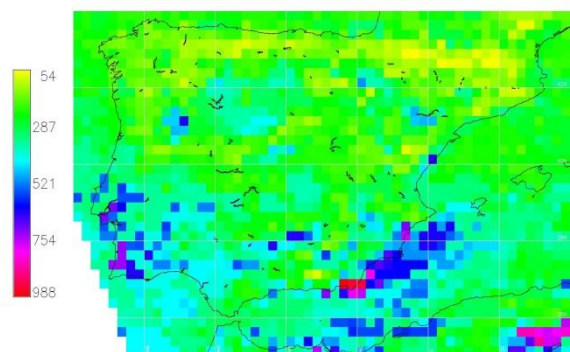


Fig. 3.9. max\_19611990\_minspell0001\_maxv10

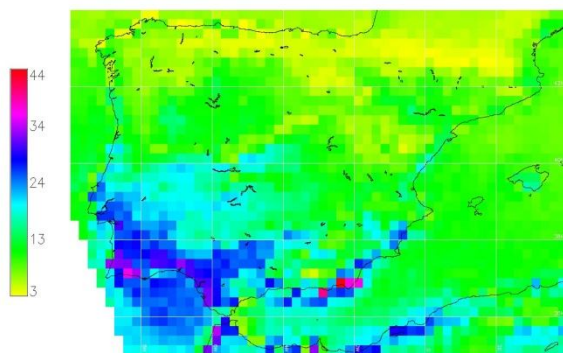


Fig. 3.10. mean\_19611990\_minspell0001\_maxv01

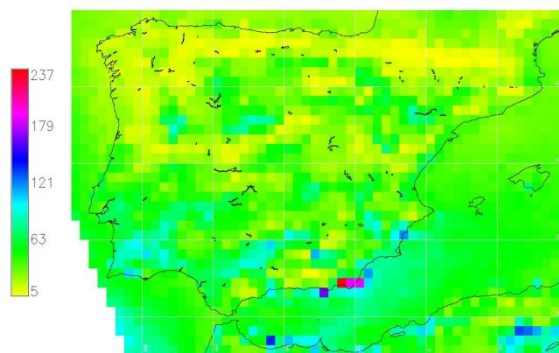


Fig. 3.11. mean\_19611990\_minspell0001\_maxv10

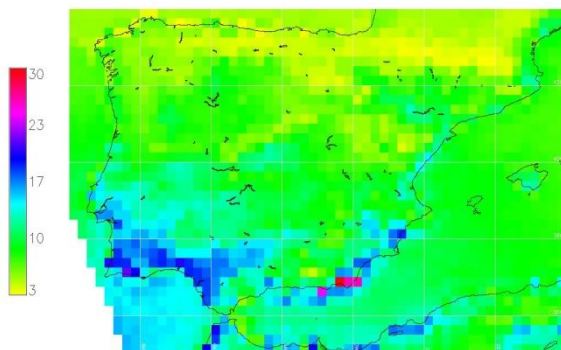


Fig. 3.12. stdev\_19611990\_minspell0001\_maxv01

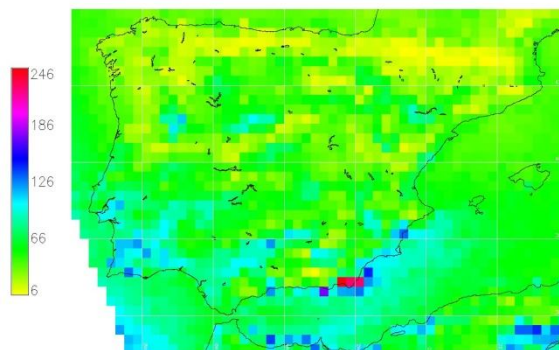


Fig. 3.13. stdev\_19611990\_minspell0001\_maxv10

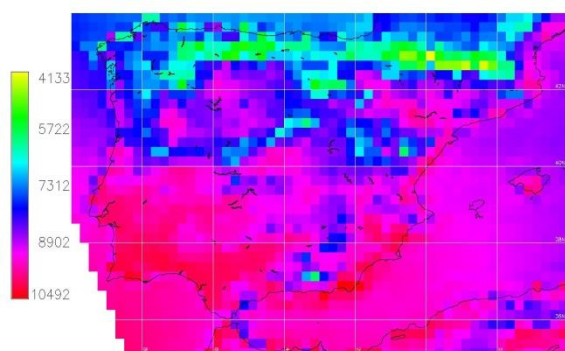


Fig. 3.14. total\_19611990\_minspell0001\_maxv01

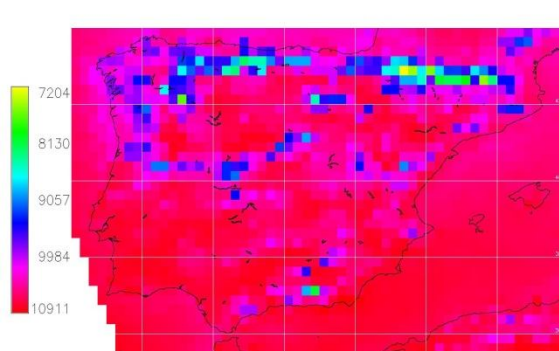


Fig. 3.15. total\_19611990\_minspell0001\_maxv10

Posteriormente, una vez obtenidos los mapas correspondientes a los tres modelos se comprobó la longitud de racha máxima para cada modelo y conocida ésta, se ejecutó otro comando que contabiliza el número de rachas existentes para distintas longitudes de racha.

En la siguiente Tabla se registra la máxima longitud de racha identificada para cada modelo, y la longitud de racha hasta la que se ha realizado el recuento.

Tabla 3.5

MODELO	L.I.	MAX. LONG. RACHA ENCONTRADA	MAX. LONG. RACHA RECONTADA
HIRHAM	RT2B	2519	2520
HIRHAM	RT3	988	1080
RCA	RT2B	1311	1440
RCA	RT3	1433	1440
RegCM	RT2B	826	900
RegCM	RT3	539	540
REALES	/	536	540

De esta manera, por ejemplo, el comando que se utilizó para realizar el recuento del número de rachas en función de su longitud para el modelo **HIRHAM** y en la línea de investigación **RT2B** quedó de la siguiente manera:

```
method=( 'count' )
lengthspell=( 0001 0002 0007 0015 0030 0045 0060 0090 0120 0150 0180 0240 0300
0360 0450 0540 0630 0720 0900 1080 1440 1800 2160 2520 )
temporada=( 19611990 19912020 20212050 20512080 )
var=( 01 10 )
r.series.spell textfile="archivo_entrada" output="nombre del archivo de salida"
method="method" minspell="lengthspell" maxspell="máxima longitud de racha"
minvar="precipitación mínima" maxvar="var"
```

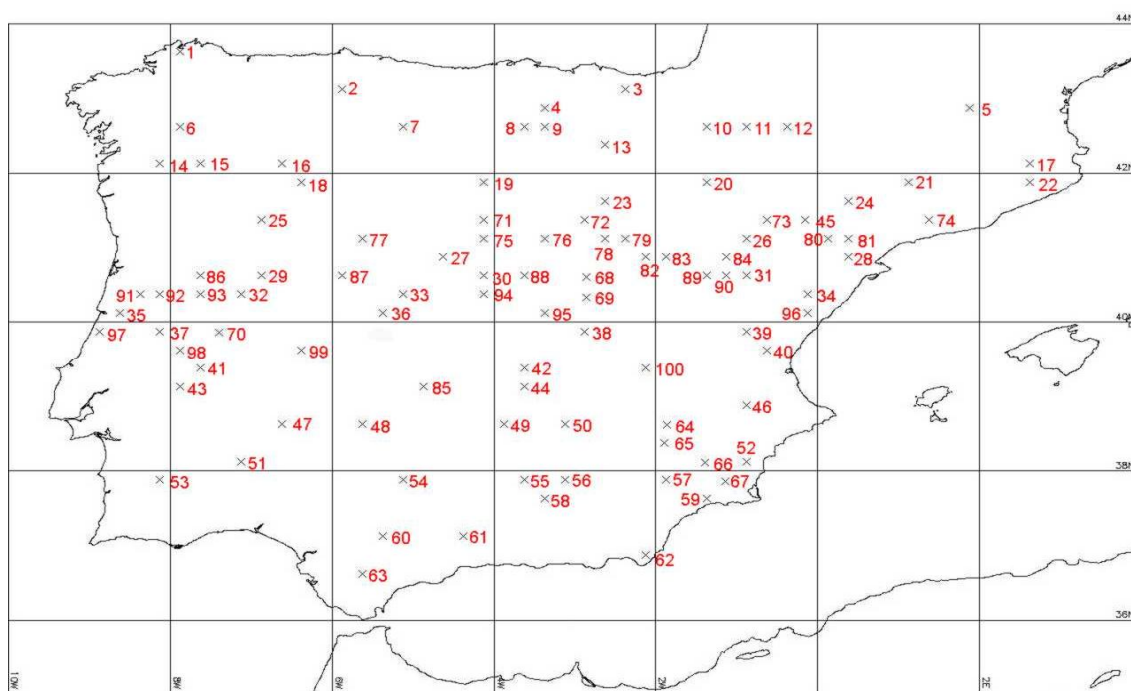
Una vez obtenidos todos los mapas correspondientes al recuento, se ha graficado el número de rachas secas en función de su longitud para los cuatro períodos (de la línea de investigación RT2B) para poder comprobar de esta manera la tendencia en la frecuencia y magnitud de las rachas secas para los cuatro períodos distintos. También se han graficado para el período 1961-1990, pero para los distintos datos (los de la línea de investigación RT2B, los de RT3 y los datos reales) para ver cuáles de los datos pertenecientes a las dos líneas de investigación se ajustan más a la realidad. Pero para ello ha sido necesario elegir con antelación los puntos del mapa que se desean graficar. En este PFC se han elegido cien puntos en toda la Península Ibérica, de los

cuales noventa y cuatro han sido elegidos al azar mediante el comando *r.random* de GRASS habiendo delimitado con anterioridad la Península Ibérica mediante una máscara creada con el comando *v.digit* para que todos los puntos quedaran dentro de la Península. Luego seis puntos adicionales han sido introducidos manualmente, debido a que son localizaciones donde interesa conocer la tendencia en la frecuencia y magnitud de las rachas secas.

Los seis puntos introducidos manualmente son los siguientes:

PUNTO	UBICACIÓN	LAT.	LON.
64	Embalse del Talave	-1.865	38.610
65	Embalse del Cenajo	-1.893	38.372
66	Embalse de Puentes	-1.390	38.105
67	El Jimenado (Torre Pacheco)	-1.137	37.861
68	Embalse de Entrepeñas	-2.862	40.611
69	Embalse de Buendía	-2.862	40.329

Los cien puntos seleccionados son los que se muestran en la *Figura 3.16*:



*Fig. 3.16. Puntos de análisis*



Tabla 3.6 Coordenadas e identificación de puntos seleccionados.

Punto	Lat.	Lon.	Punto	Lat.	Lon.	Punto	Lat.	Lon.
1	-7.875	43.625	21	1.125	41.875	41	-7.625	39.375
2	-5.875	43.125	22	2.625	41.875	42	-3.625	39.375
3	-2.375	43.125	23	-2.625	41.625	43	-7.875	39.125
4	-3.375	42.875	24	0.375	41.625	44	-3.625	39.125
5	1.875	42.875	25	-2.875	41.125	45	-0.153	41.375
6	-7.875	42.625	26	-0.875	41.125	46	-0.875	38.875
7	-5.125	42.625	27	-4.625	40.875	47	-6.625	38.625
8	-3.625	42.625	28	0.375	40.875	48	-5.625	38.625
9	-3.375	42.625	29	-6.875	40.625	49	-3.875	38.625
10	-1.375	42.625	30	-4.125	40.625	50	-3.125	38.625
11	-0.875	42.625	31	-0.875	40.625	51	-7.125	38.125
12	-0.375	42.625	32	-7.125	40.375	52	-0.875	38.125
13	-2.625	42.375	33	-5.125	40.375	53	-8.125	37.875
14	-8.125	42.125	34	-0.125	40.375	54	-5.125	37.875
15	-7.625	42.125	35	-8.625	40.125	55	-3.625	37.875
16	-6.625	42.125	36	-5.375	40.125	56	-3.125	37.875
17	2.625	42.125	37	-8.125	39.875	57	-1.875	37.875
18	-6.375	41.875	38	-2.875	39.875	58	-3.375	37.625
19	-4.125	41.875	39	-0.875	39.875	59	-1.375	37.625
20	-1.375	41.875	40	-0.625	39.625	60	-5.375	37.125

Punto	Lat.	Lon.	Punto	Lat.	Lon.
61	-4.375	37.125	81	0.375	41.125
62	-2.125	36.875	82	-2.125	40.875
63	-5.625	36.625	83	-1.875	40.875
64	-1.865	38.610	84	-1.125	40.875
65	-1.893	38.372	85	-0.153	41.375
66	-1.390	38.105	86	-7.625	40.625
67	-1.137	37.861	87	-6.875	40.625
68	-2.862	40.611	88	-3.625	40.625
69	-2.862	40.329	89	-1.375	40.625
70	-7.397	39.864	90	-1.125	40.625
71	-4.125	41.375	91	-8.375	40.375
72	-2.875	41.375	92	-8.125	40.375
73	-0.625	41.375	93	-7.625	40.375
74	1.375	41.375	94	-4.125	40.375
75	-4.125	41.125	95	-3.375	40.125
76	-3.375	41.125	96	-0.125	40.125
77	-2.875	41.125	97	-8.875	39.875
78	-2.625	41.125	98	-7.875	39.625
79	-2.375	41.125	99	-6.375	39.625
80	0.125	41.125	100	-5.375	37.125

Una vez seleccionados correctamente los cien puntos, se ha graficado para cada punto el número de rachas secas en función de su longitud (en días). Para ello, se ha utilizado el programa estadístico "R". Pero para poder procesar la información extraída de los mapas desde el software "R", se debe realizar con anterioridad una transformación bajo GRASS. Mediante el comando

*r.what.input* se ha generado un archivo que contiene los datos de: - media de los logaritmos, - máximos, - media, - desviación típica y - número total de rachas secas con longitud de un día para valores de precipitación inferiores a 1 y 10 mm, junto con los datos que contienen el número de rachas existentes para distintas longitudes de racha de cada punto citado en la *Tabla 3.5* anterior. El archivo generado mediante este comando puede entonces ser procesado bajo “R”, para generar las curvas anteriormente mencionadas.

Estos puntos han sido sometidos a un ajuste por máxima verosimilitud de una función gamma, para poder calcular así la probabilidad de que se dé una racha cualquiera. Es por eso que cada punto ha sido graficado para una longitud mínima de 1, 7 y 30 día, porque parece existir curvas distintas a partir de esas longitudes de racha mínimas.

PERÍODO	COLOR	Tanto los puntos como las curvas del ajuste por máxima verosimilitud de una función gamma han sido representados en distintos colores para cada período para poder identificarlos y compararlos más fácilmente. Los colores asignados a cada período son los que se muestran en la tabla adjunta. Los
1961-1990	Rojo	
1991-2020	Verde	
2021-2050	Azul	
2051-2080	Amarillo	período son los que se muestran en la tabla adjunta. Los

gráficos que se muestran a partir de la *Figura 4.17*, están presentados de izquierda a derecha y de la parte superior a la inferior de cada imagen perteneciendo a una longitud mínima de 1, 7 y 30 días respectivamente.

DATOS	COLOR	También sucede esto para los gráficos en los que se representa el período 1961-1990 para los datos procedentes de la línea de investigación RT2B y RT3 así como los datos reales, siendo los colores utilizados para cada serie de datos los que se muestran en
RT2B	Rojo	
RT3	Verde	
REALES	Azul	tabla anterior.

### 3.7.2 Precipitación media anual

Para evaluar la precipitación media anual del período bajo análisis, se ha estimado su distribución espacial desde GRASS mediante el comando *r.mapcalc*, acumulando los mapas de precipitación diaria de cada período de 30 años y dividiendo el mapa resultante por el número de años (en este caso 30). Una vez obtenido este mapa se han definido los mapas de isohietas (comando del SIG GRASS *r.contour*), correspondientes a los valores representados en la *Tabla 3.7*.

Tabla 3.7

ISOHIETA	COLOR	ISOHIETA	COLOR
250	Rojo	1000	Verde
500	Naranja	1500	Azul Cian
750	Amarillo	2000	Azul oscuro

Para poder cuantificar en qué medida variará la precipitación media anual los distintos periodos de análisis, se ha

cuantificado el porcentaje de variación de la precipitación media anual de cada periodo con respecto al periodo 1961-1990. Estas estimaciones se han llevado a cabo tanto para los datos de la línea de investigación RT2B como para los de RT3, y los datos reales de precipitación.

Con el fin de contrastar todos los mapas visualmente sin dar lugar a confusión, se ha creado una misma tabla de colores para los distintos porcentajes de variación de la precipitación media anual. Para ello, se ha identificado el rango de variación de cada modelo, según se presenta en la Tabla siguiente.

Tabla 3.8

MODELO	% VARIACIÓN POSITIVA	% VARIACIÓN NEGATIVA
HIRHAM	38	-56
RCA	325	-50
RegCM	66	-52

Desde la Tabla 3.8, se observa un porcentaje de variación positiva del modelo RCA en

en diferente orden de magnitud que el resto de RCMs. Este hecho, será analizado con mayor detenimiento.

La tabla de colores finalmente utilizada para la representación de mapas de porcentaje de variación de precipitación media anual, se presenta en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9

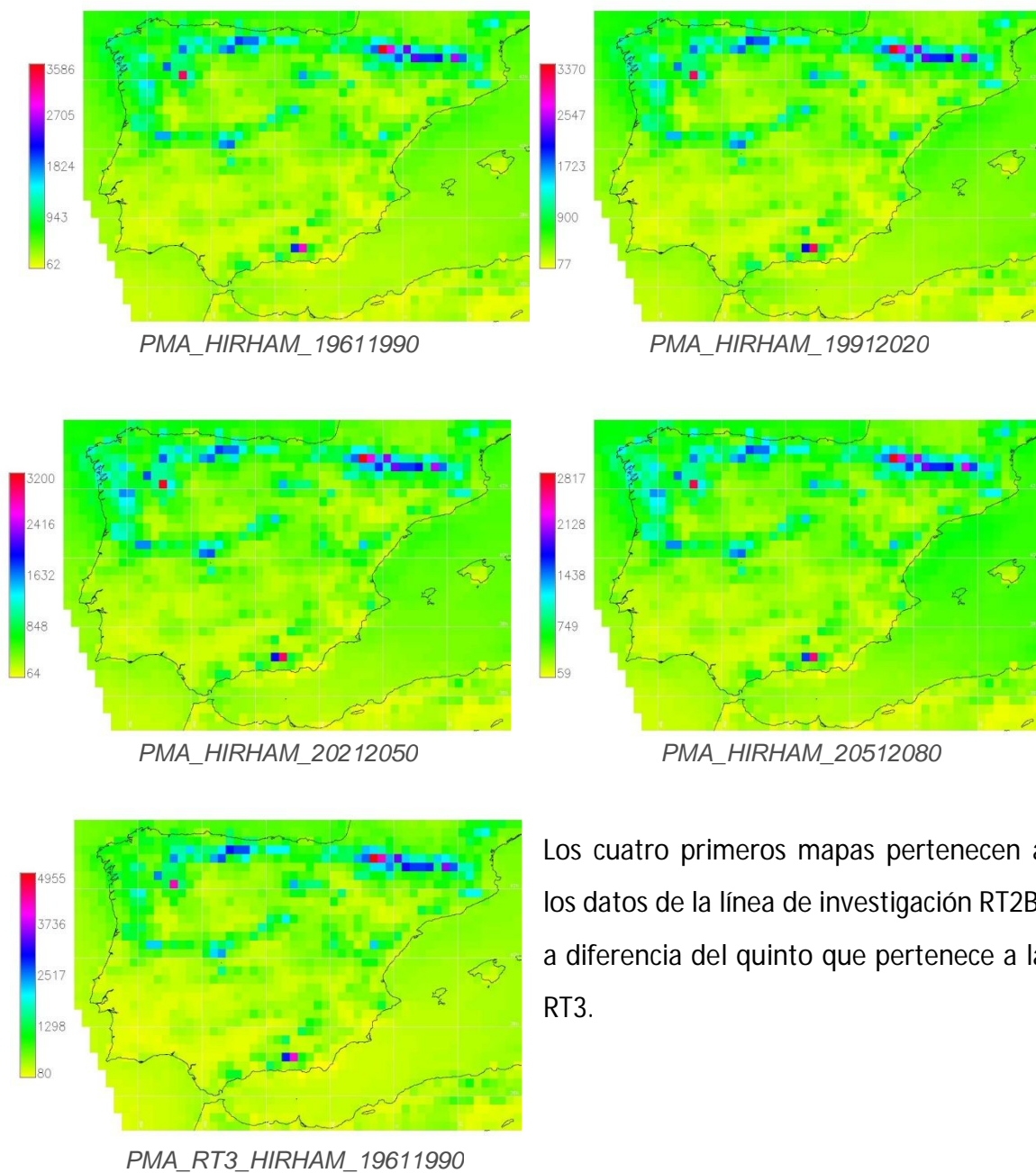
COLOR	% VARIACIÓN	
Negro	-350	% Variación negativa
Rojo	-60	
Naranja	-36	
Amarillo	-12	
Verde	12	% Variación positiva
Azul Cian	36	
Azul Oscuro	60	
Blanco	350	

# CAPITULO 4

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL

Para el modelo HIRHAM, los mapas de Precipitación Media Anual obtenidos para cada período, se presentan en *Figura 4.1* siguiente



*Fig. 4.1. Precipitación media anual para cada período. Modelo HIRHAM*

Para una mejor comprensión visual, estos mapas de Precipitación Media Anual, también se han representado mediante mapas de isohietas. (Figura 4.2)

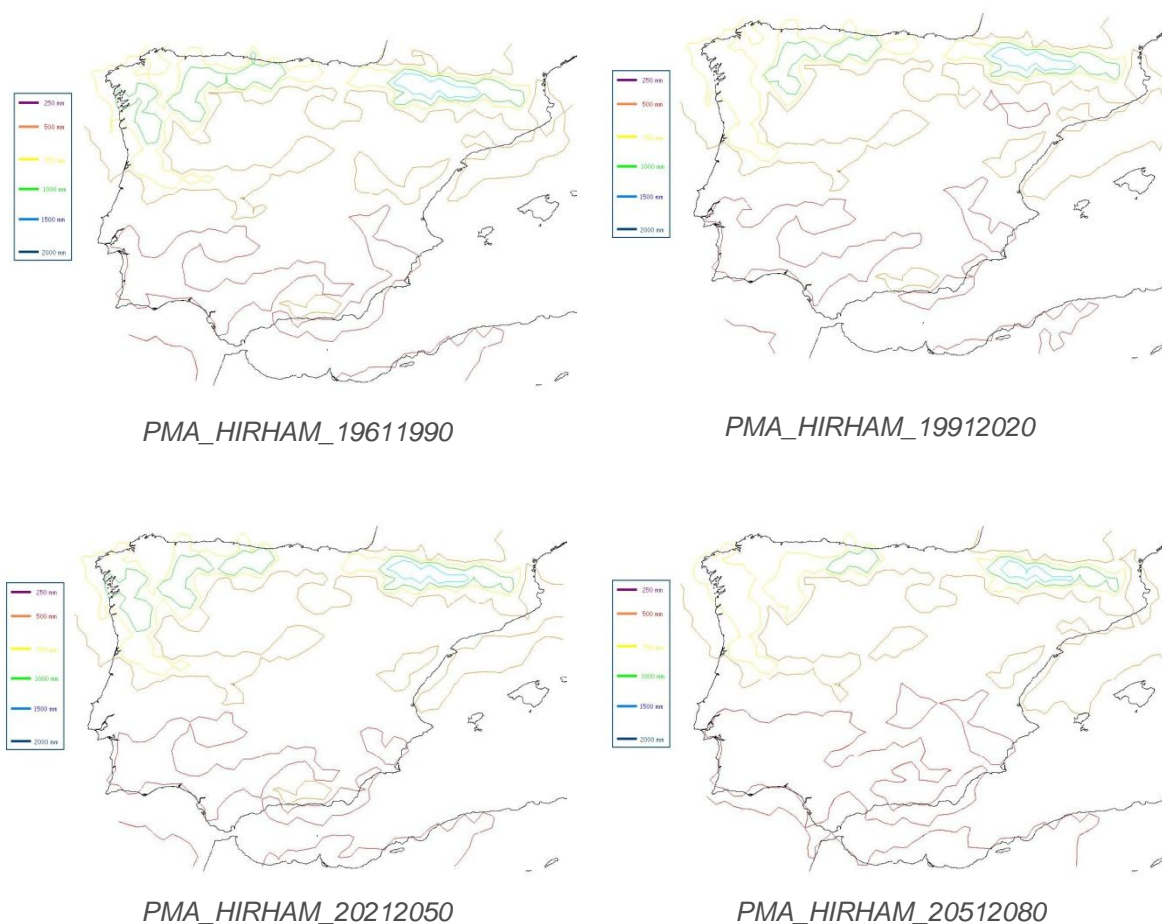
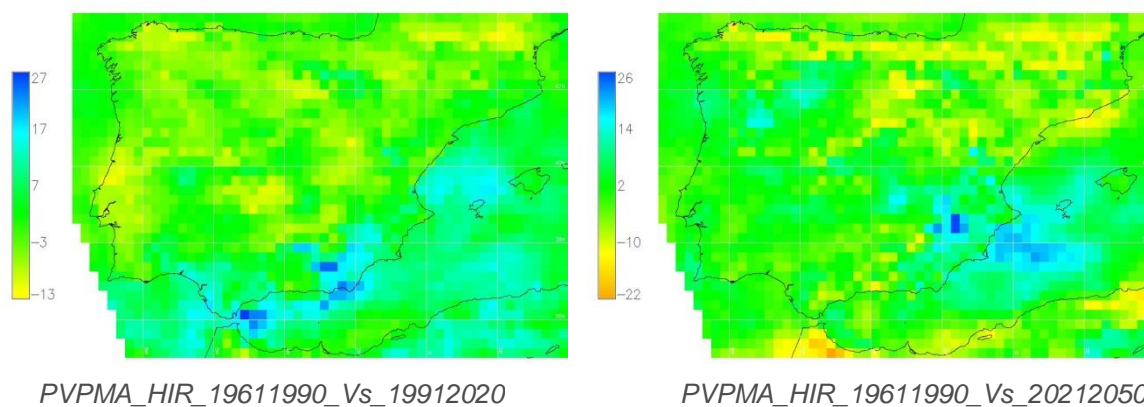


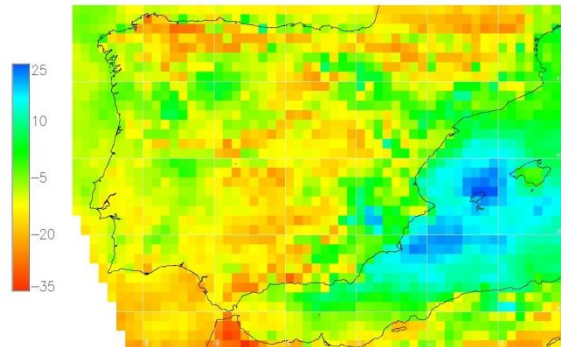
Fig. 4.2. Isohietas de Precipitación Media Anual para cada período. Modelo HIRHAM.

Desde los mapas de la Figura 4.2, se aprecian las variaciones de precipitación (en general, descensos de precipitación para períodos futuros). Para cuantificar claramente los ascensos y descensos de precipitación, se han obtenido los mapas de porcentaje de variación de precipitación media anual para cada período en contraste con el período de control (1961-1990), considerando la línea investigadora RT2B.





$$\frac{P_{\text{Período } a} - P_{\text{Período } 1961_{1990}}}{P_{\text{Período } 1961_{1990}}} \times 100$$



PVPMMA\_HIR\_19611990\_Vs\_20512080

Fig. 4.3. PVPMA\_HIRHAM\_RT2B\_Vs\_RT2B

Desde los mapas previos para la línea de investigación RT2B (Figura 4.3), se puede observar claramente un aumento general de las precipitaciones en la vertiente mediterránea (Sudeste Peninsular). Permaneciendo prácticamente sin cambios el resto de la península (excepto la vertiente Cantábrica y los Pirineos), para los períodos 1991-2020 y 2021-2050. En el caso del período 2051-2080, se aprecia también un aumento de las precipitaciones (tonos azulados) en la vertiente Mediterránea y parte de la cuenca del Ebro, mientras el resto de la Península presenta una clara disminución de las precipitaciones (tonos naranja).

Se debe destacar que los resultados obtenidos para la línea de investigación RT3, son notoriamente diferentes. Si se estima el porcentaje de variación de precipitación media anual de los períodos 1961-1990, 1991-2020, 2021-2050 y 2051-2080 con respecto al período 1961-1990, procedente de los datos de la línea de investigación RT3 se obtienen una serie de mapas que se representan en la Figura 4.4

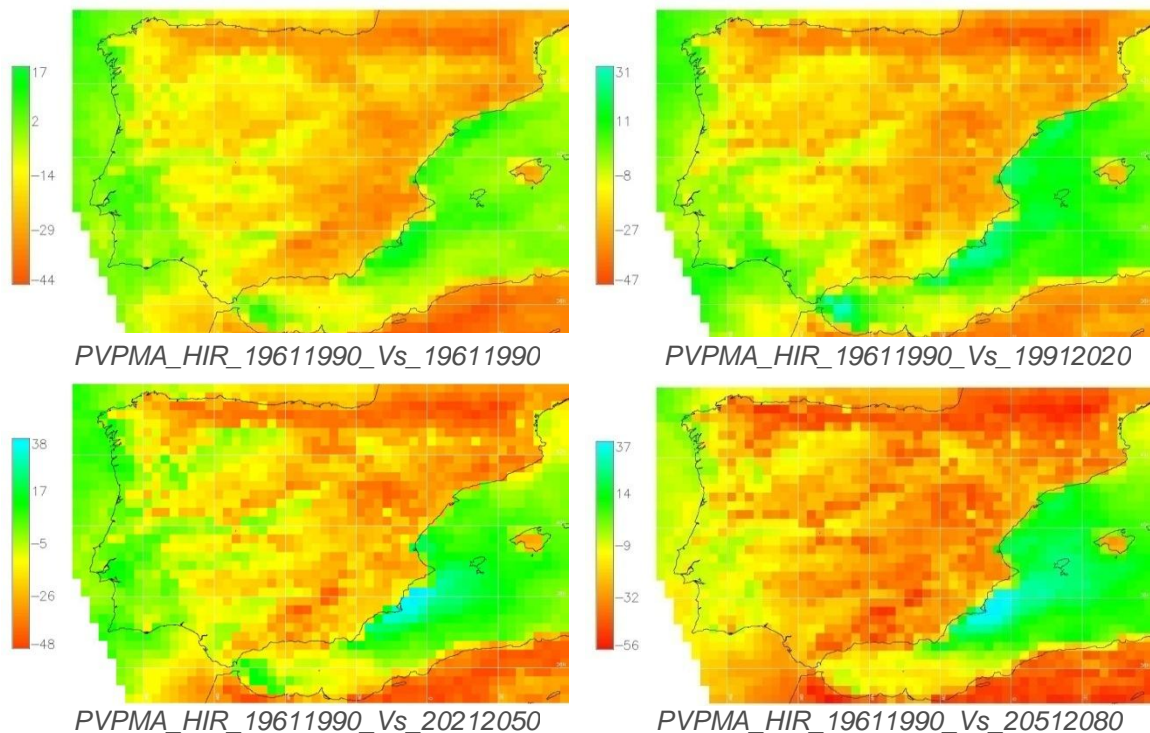


Fig. 4.4. PVPMA\_HIRHAM\_RT3\_Vs\_RT2B

Desde estos mapas se aprecia, en líneas generales para los cuatro períodos, una clara disminución de las precipitaciones para la vertiente Mediterránea y la Cantábrica, así como para los Pirineos, algo más acusada en el período 2051-2080 que en los restantes. No obstante, se aprecia un ligero aumento de las precipitaciones en la vertiente Atlántica de la Península, así como en el Mar Mediterráneo.

Con el objetivo de validar los modelos, se ha estimado la Precipitación Media Anual (PMA) a partir de las mallas de precipitación histórica. Para luego estimar el porcentaje de variación de PMA de los datos reales para el período 1961-1990, con respecto a ese mismo período de los datos del modelo de la línea de investigación RT2B. Los resultados obtenidos se presentan en la *Figura 4.6* siguiente.

Como se puede observar desde esta *Figura 4.6*, el rango de variación de los porcentajes (PMA de los datos reales con respecto a los del modelo HIRHAM) es importante. Se debe analizar cómo se justifica esta divergencia. En qué período (estación o estaciones) del año se concentra la divergencia, o por lo contrario si se halla distribuida de una forma uniforme en el año, o bien si está en función de la tipología de años (años húmedos, años secos). Una mayor investigación en esta línea, debe ser acometida.

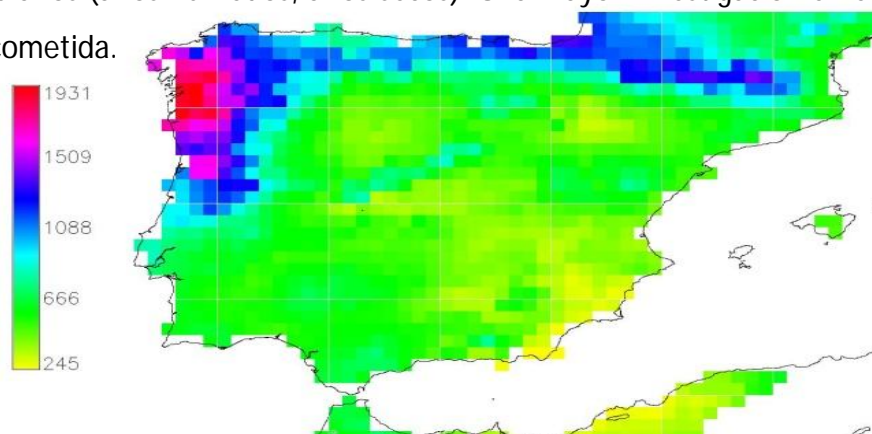


Fig. 4.5. PMA\_REALES\_19611990

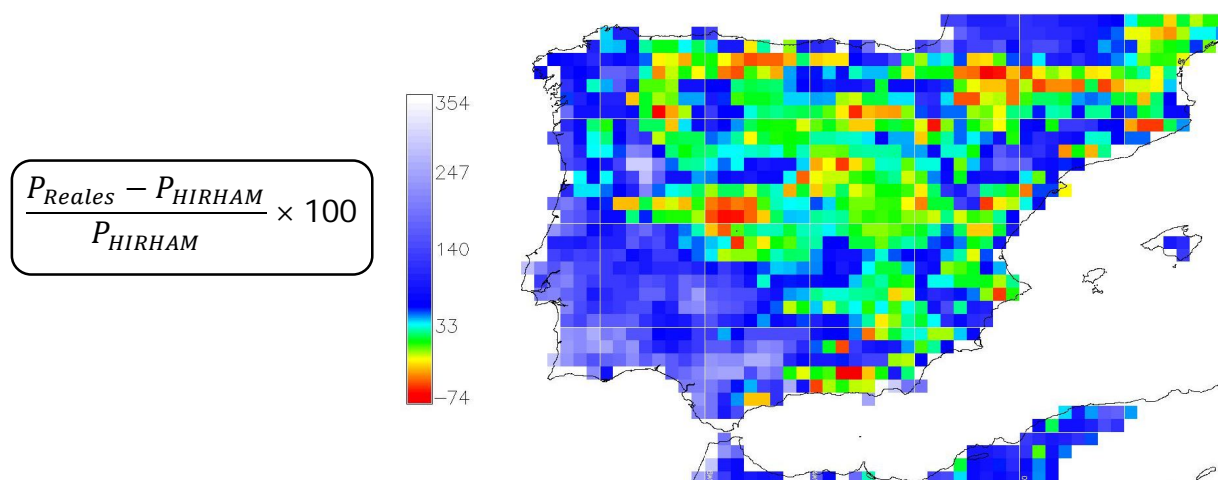
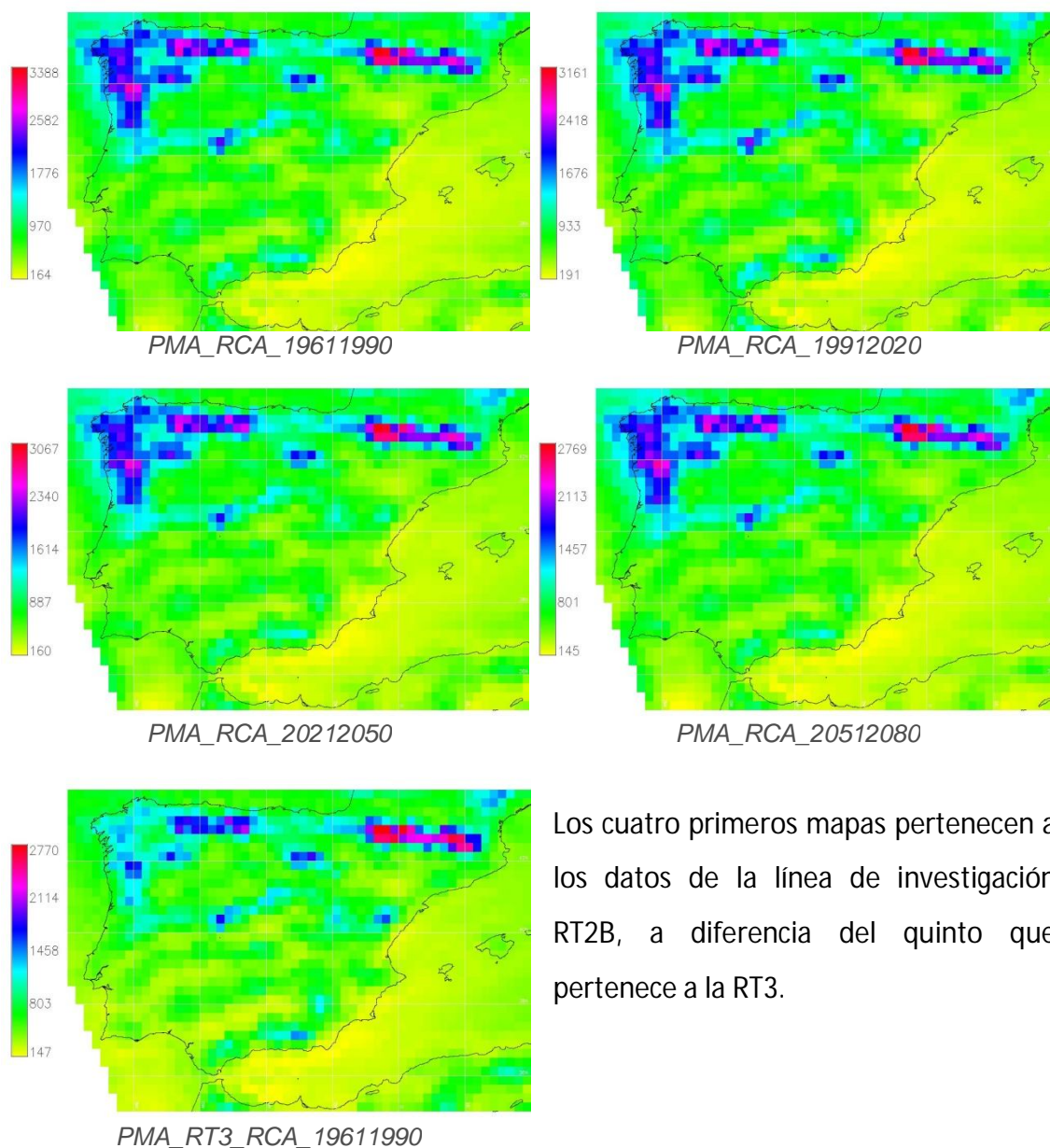


Fig. 4.6. PVPMA\_REALES\_Vs\_HIRAM\_19611990

Para el modelo RCA, los mapas de PMA obtenidos se presentan en las *Figura 4.7* siguiente.



Los cuatro primeros mapas pertenecen a los datos de la línea de investigación RT2B, a diferencia del quinto que pertenece a la RT3.

*Fig. 4.7. Precipitación Media Anual para cada período. Modelo RCA.*

De forma similar al caso anterior, se presentan las isohietas de precipitación media anual. (*Figura 4.8*).



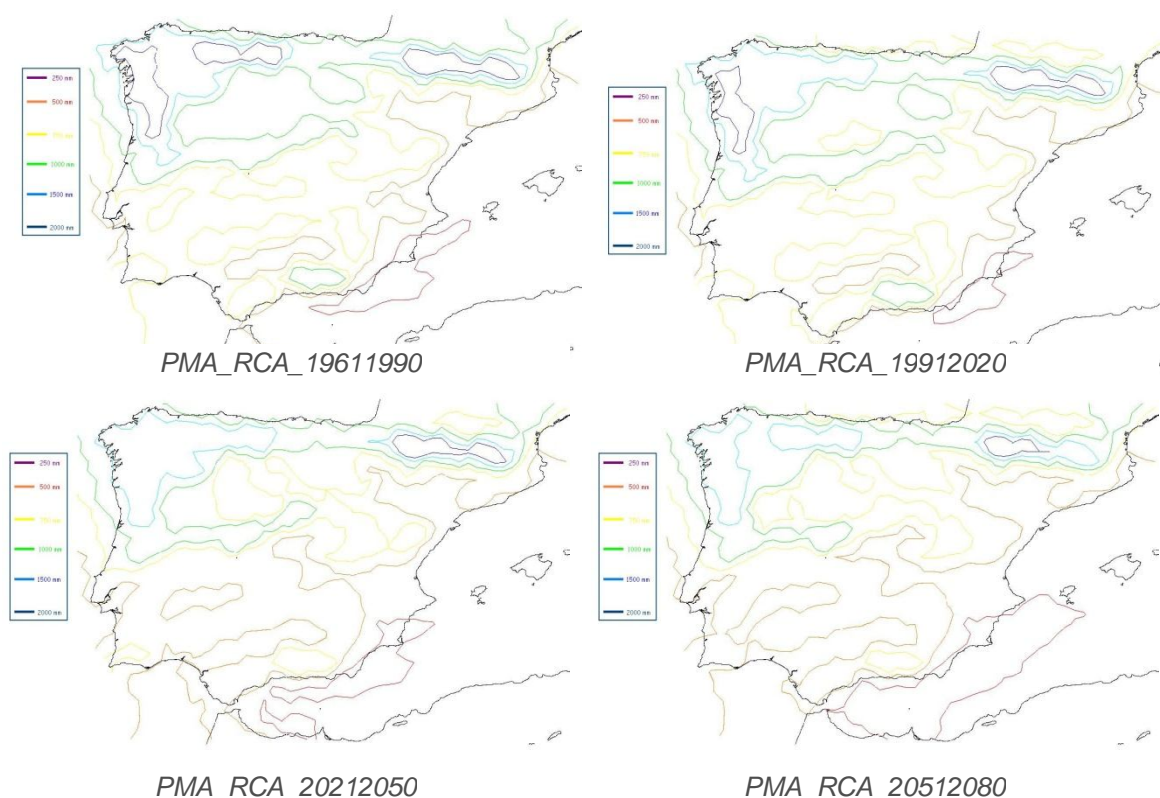
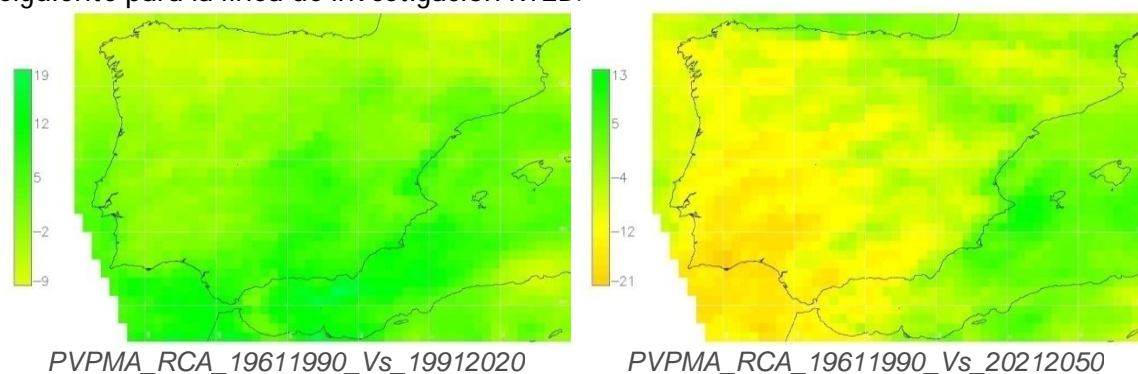


Fig. 4.8. Isohietas de Precipitación Media Anual para cada período. Modelo RCA.

Desde estos mapas, se aprecia una considerable disminución de la precipitación tal y como se puede observar con la isohieta de 2000 mm situada en el noroeste de la Península, que se va reduciendo hasta desaparecer en el período 2021-2050. También esa misma isohieta situada en los Pirineos se va reduciendo considerablemente. Se puede apreciar también esa disminución de la precipitación, analizando el comportamiento de la isohieta de 250 mm y 500 mm, ambas van ganando terreno sobre las de 500 mm y 750mm respectivamente conforme se avanza en el tiempo (proyecciones).

Luego para estimar en qué cuantía varia la precipitación espacialmente en cada período, se estima la distribución espacial de los porcentajes de variación de forma similar al caso anterior (modelo anterior). Los resultados se presentan en la *Figura 4.9* siguiente para la línea de investigación RT2B.



$$\frac{P_{\text{Período } a} - P_{\text{Período } 1961_{1990}}}{P_{\text{Período } 1961_{1990}}} \times 100$$

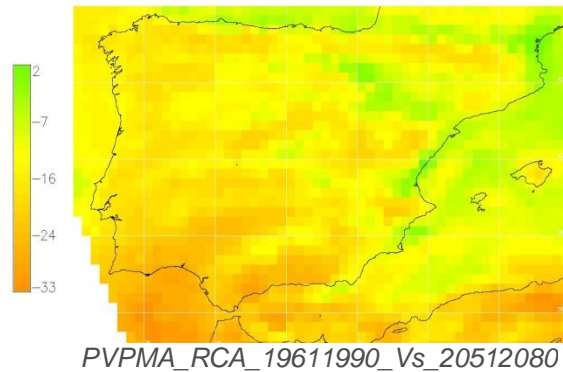


Fig. 4.9. PVPMA\_RCA\_RT2B\_Vs\_RT2B

Tal y como se puede observar, para el período 1991-2020, parece existir un aumento de las precipitaciones generalizado en toda la Península excepto en el noroeste. Para el período 2021-2050, las precipitaciones tienden a aumentar en la franja Mediterránea y en la Cuenca del Ebro, produciéndose en el resto de la Península una apreciable disminución de las precipitaciones. Por último, para el período 2051-2080, parece existir una disminución considerable de las precipitaciones generalizada en toda la Península excepto en la Cuenca del Ebro y el Golfo de Valencia.

Al igual que ocurría con el modelo anterior, los resultados son claramente diferentes si se estima el porcentaje de variación de precipitación media anual de los períodos 1961-1990, 1991-2020, 2021-2050 y 2051-2080 con respecto al período 1961-1990 procedente de los datos de la línea de investigación RT3. Estas diferencias se pueden apreciar en los mapas representados en la Figura 4.10 siguiente.

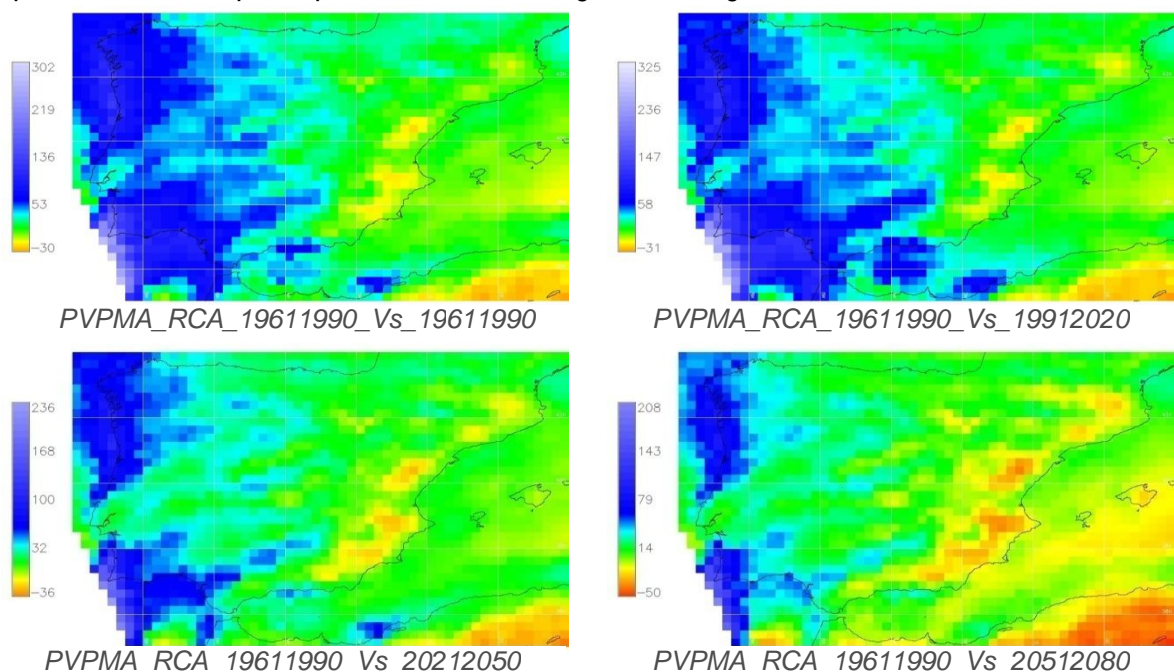


Fig. 4.10. PVPMA\_RCA\_RT3\_Vs\_RT2B

Los resultados que se obtienen al contrastar los períodos 1991-2020, 2021-2050 y 2051-2080 con el período 1961-1990, para la línea de investigación RT3, presentan rangos de variación positivos del orden 200 al 300% para el tercio occidental de la Península Ibérica. En cambio, para la vertiente mediterránea se observan descensos de precipitación de hasta un 50% para el período 2051-2080. Se debe profundizar en la justificación de estos elevados porcentajes aumento en el tercio occidental de la Península Ibérica.

Tal y como se ha realizado para el modelo anterior, para analizar el grado de discrepancia entre las resultados del modelo y las mallas de precipitación que representan la realidad, se ha estimado la distribución espacial del porcentaje de variación de la precipitación media anual con respecto al período 1961-1990 de los datos procedentes de la línea de investigación RT2B (Figura 4.11).

Observando la Figura 4.11 previa, se puede apreciar que el modelo RCA parece representar con algo más de exactitud la realidad que el modelo HIRHAM (al menos para la Península Ibérica), pero a pesar de todo, los porcentajes de divergencia son elevados ya que tal y como se puede observar son del orden del +90% al -70%. Como en modelos anteriores, se destaca que se debe profundizar en la distribución temporal de estas divergencias a lo largo del año (estaciones) y a escala decadal (analizando años húmedos y secos).

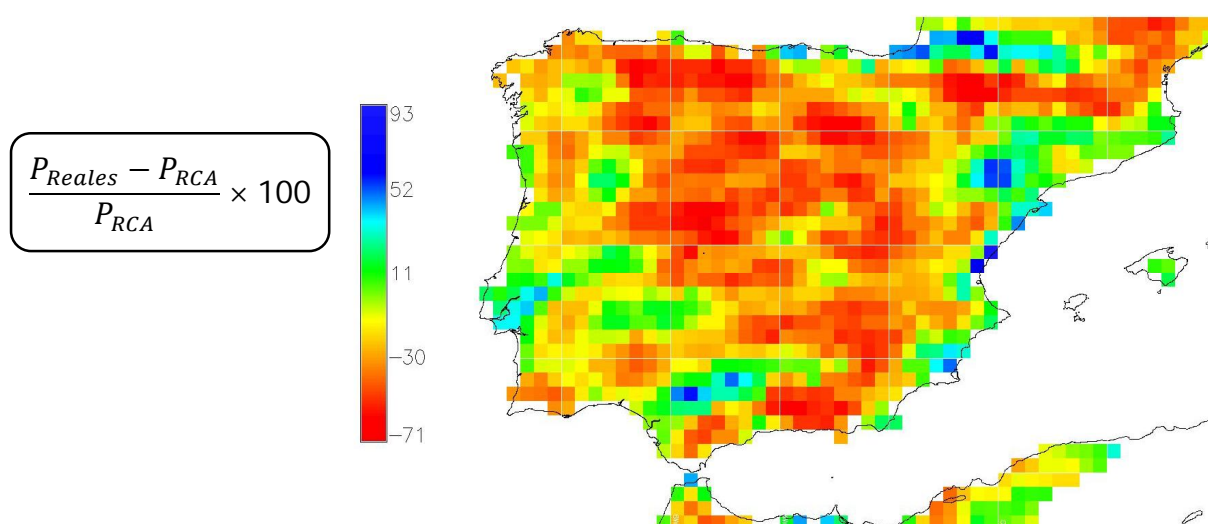


Fig. 4.11. PVPMA\_REALES\_Vs\_RCA\_19611990

Por último **para el modelo RegCM** los mapas obtenidos de Precipitación Media Anual (PMA) se representan en la Figura 4.12 siguiente. Desde la misma, al igual que para los dos modelos anteriores, se observa que los cuatro primeros mapas representan la



PMA de los períodos 1961-1990, 1991-2020, 2021-2050 y 2051-2080, respectivamente para la línea de investigación RT2B. Mientras que el quinto mapa, representa la PMA para el período 1961-1990 para la línea de investigación RT3.

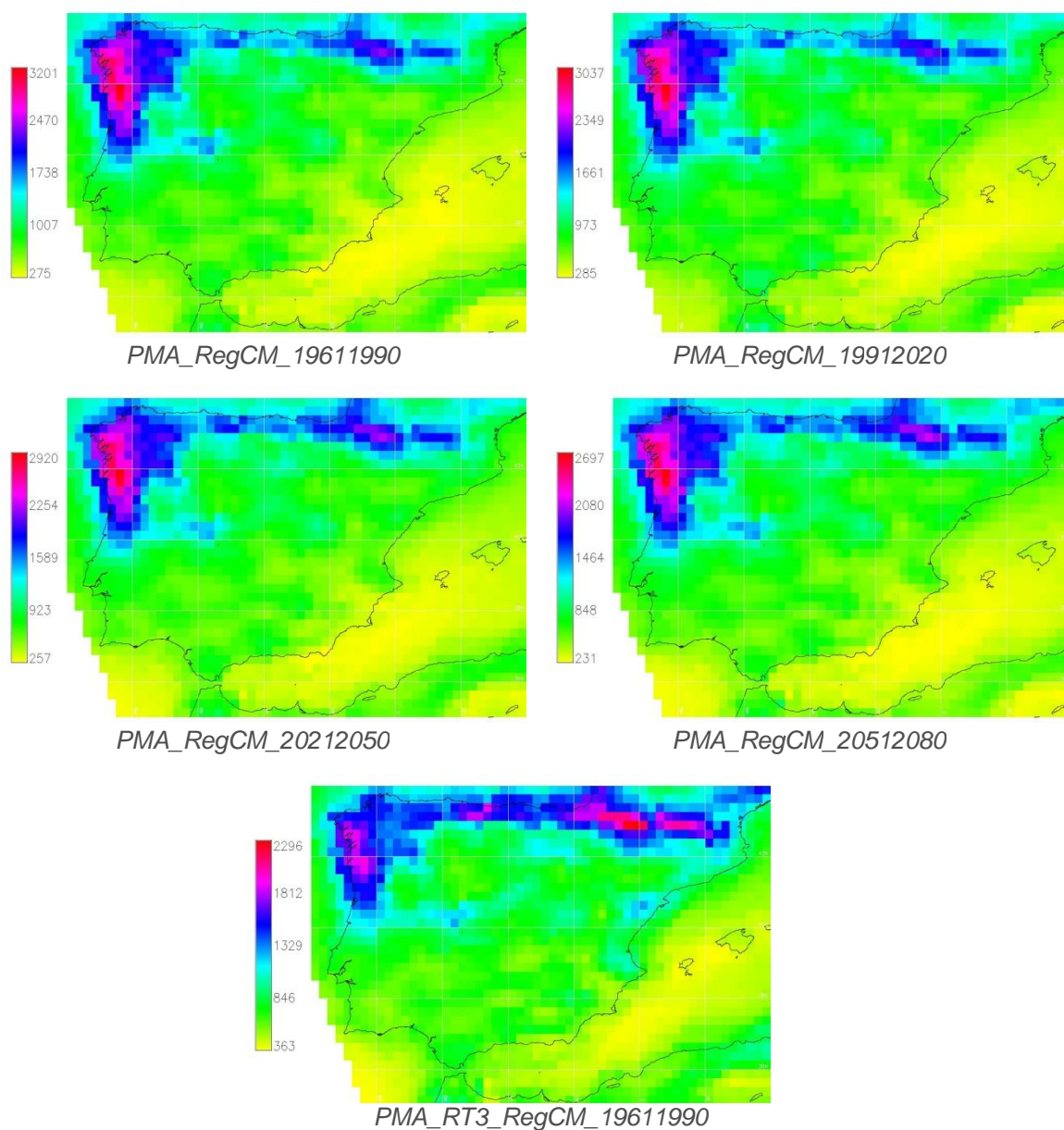


Fig. 4.12. Precipitación Media Anual para cada período. Modelo RegCM.

Las isohietas de los cuatro mapas correspondientes a los datos de la línea de investigación RT2B, se presentan en la Figura 4.13 siguiente. Desde los mismos, parece apreciarse un descenso más o menos generalizado de las precipitaciones conforme se avanza en el tiempo (en las proyecciones).

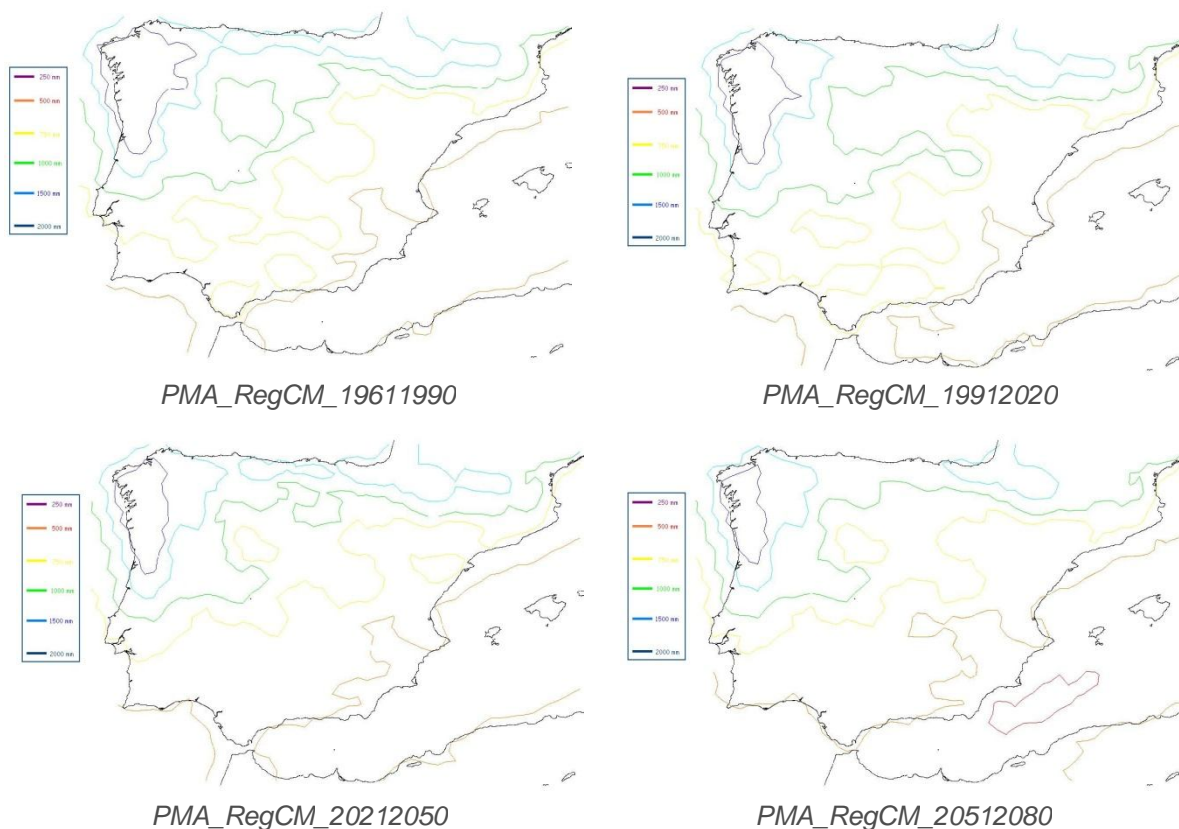
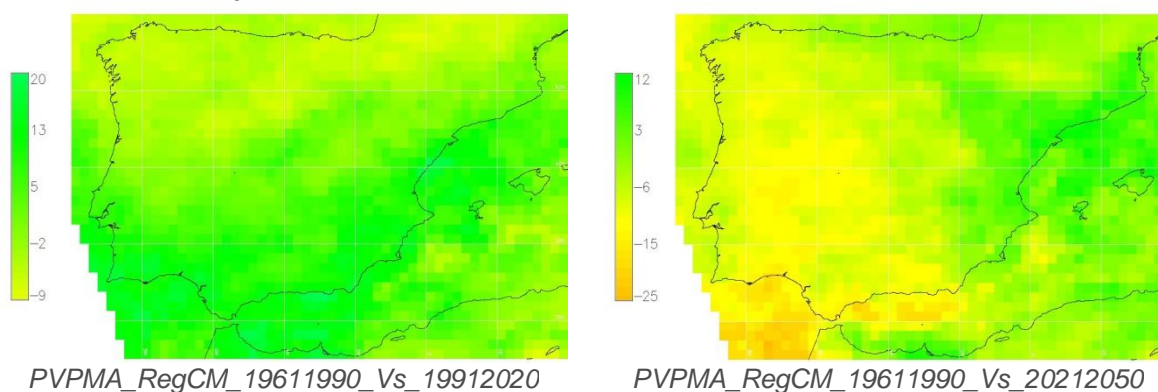
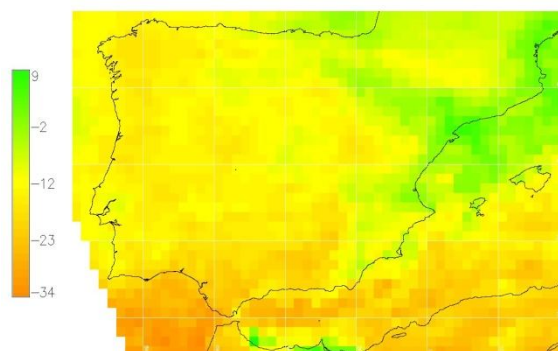


Fig. 4.13. Isohietas de Precipitación Media Anual para cada período. Modelo RegCM.

Desde los mapas de porcentaje de variación de precipitación media anual (Figura 4.14) para cada período temporal respecto al período de control 1961-1990, línea de investigación RT2B, se observa que los resultados son similares a los obtenidos para el modelo RCA. Tal y como sucede en el modelo RCA se puede observar que para el período 1991-2020, parece existir un aumento de las precipitaciones generalizado en toda la Península excepto en el noroeste. Mientras para el período 2021-2050, las precipitaciones tienden a aumentar en la franja Mediterránea y en la Cuenca del Ebro, produciéndose en el resto de la Península una apreciable disminución de las precipitaciones. Por último, para el período 2051-2080, parece existir una disminución considerable de las precipitaciones generalizada en toda la Península excepto en la Cuenca del Ebro y el Golfo de Valencia.



$$\frac{P_{\text{Período a compara}} - P_{\text{Período 1961_1990}}}{P_{\text{Período 1961_1990}}} \times 100$$



PVPMA\_RegCM\_19611990\_Vs\_20512080  
Fig. 4.14. PVPMA\_RegCM\_RT2B\_Vs\_RT2B

Al igual que para los dos modelos anteriores, para el presente (RegCM) también se ha estimado el porcentaje de variación de precipitación media anual de los períodos 1961-1990, 1991-2020, 2021-2050 y 2051-2080 con respecto al período 1961-1990 línea de investigación RT3. Los mapas obtenidos se presentan en la Figura 4.15 siguiente.

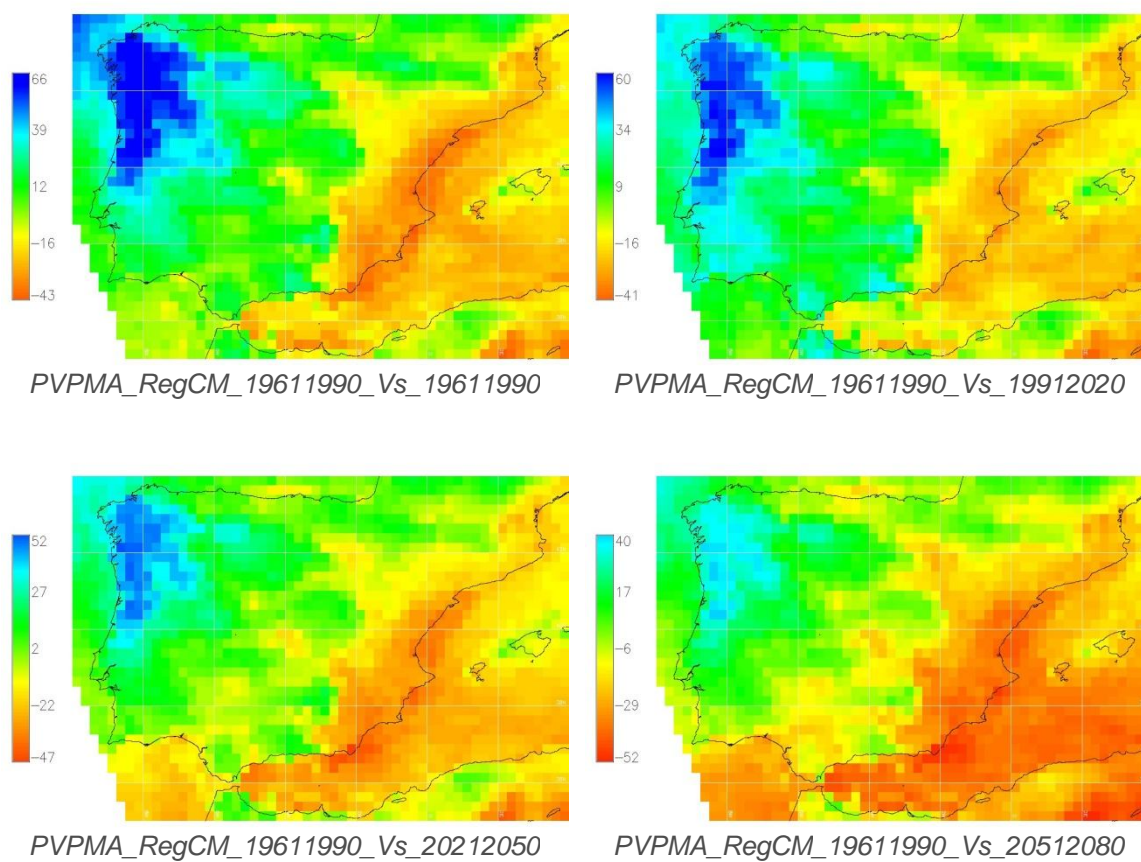


Fig. 4.15. PVPMA\_RegCM\_RT3\_Vs\_RT2B



Desde los mapas previos (Figura 4.15) se puede apreciar en líneas generales para los cuatro periodos, una clara disminución de las precipitaciones para la vertiente Mediterránea, más acusada conforme se avanza en el tiempo. En cambio también se aprecia un considerable aumento de las precipitaciones en la vertiente Atlántica de la Península, principalmente en el noroeste peninsular.

También para este modelo (RegCM) se ha comprobado su ajuste con la realidad, calculando el mapa de porcentaje de variación de la precipitación media anual con respecto al período 1961-1990 para la línea de investigación RT2B, y el resultado se presenta en la Figura 4.16 siguiente. El modelo RegCM, aunque parece ajustarse más que los modelos HIRHAM y RCA, también difiere de la realidad en un rango de variación 26 % al -73%.

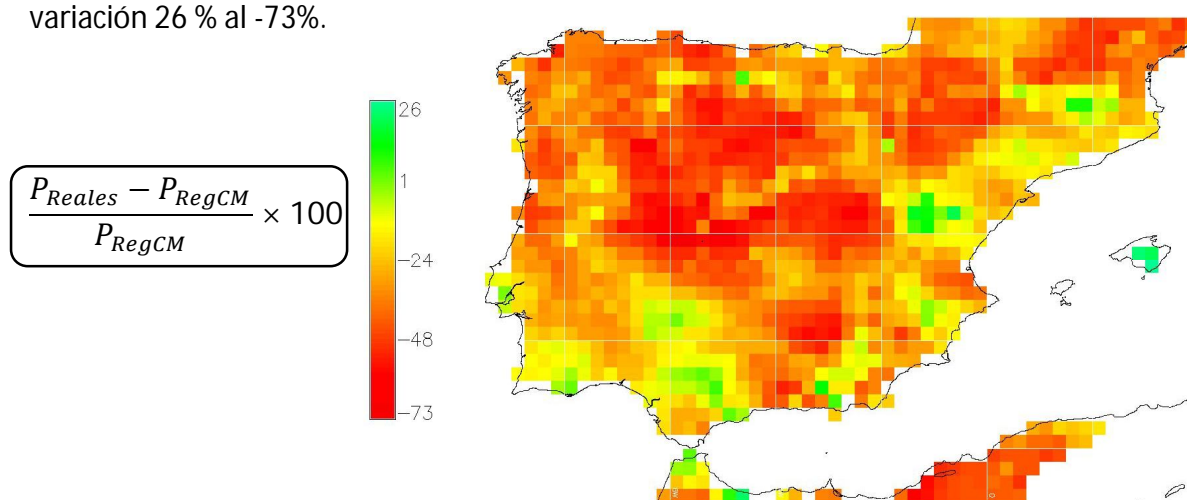
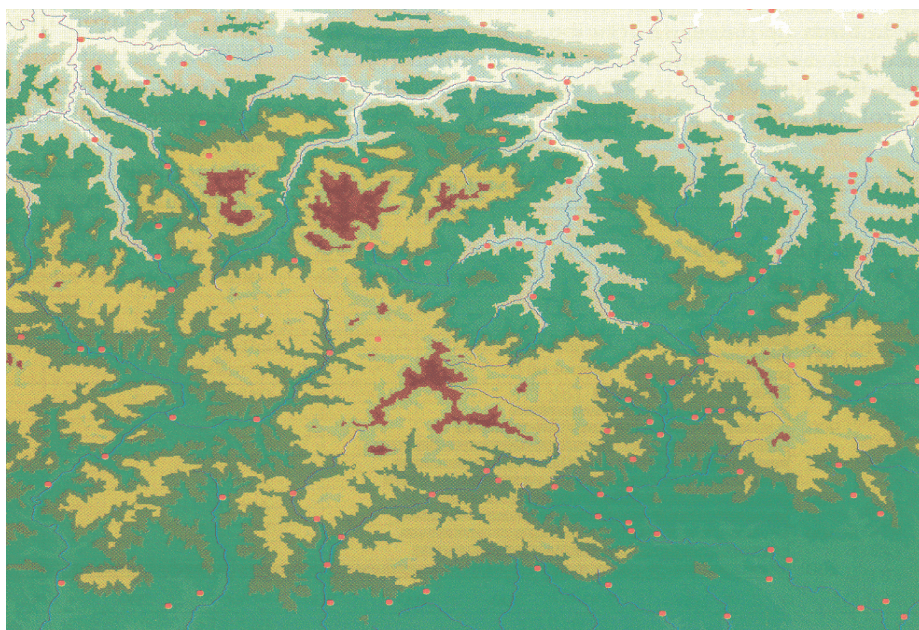


Fig. 4.16. PVPMA\_REALES\_Vs\_RegCM\_19611990

Dado el comportamiento observado de los tres RCM, se concluye que en zonas montañosas presentan sobreestimaciones de la precipitación. Una hipótesis que podría explicar esta diferencia, se basa en que justamente en estas zonas (Picos de Europa, Pirineos, Sierra Nevada, y otras), existen importantes falencias en las redes meteorológicas. Este problema tiene especial importancia para la elaboración de las mallas de precipitaciones diarias obtenidas por interpolación desde pluviómetros para el período 1961-1990. Debido a que la orografía del terreno influye fuertemente en las precipitaciones. Una elevación del terreno provoca muy frecuentemente un aumento local de las precipitaciones, al provocar la ascensión de las masas de aire saturadas de vapor de agua.

Este falencia en la red meteorológica se puede observar en la Figura siguiente sacada del Libro Blanco del Agua (MIMAM, 2000).

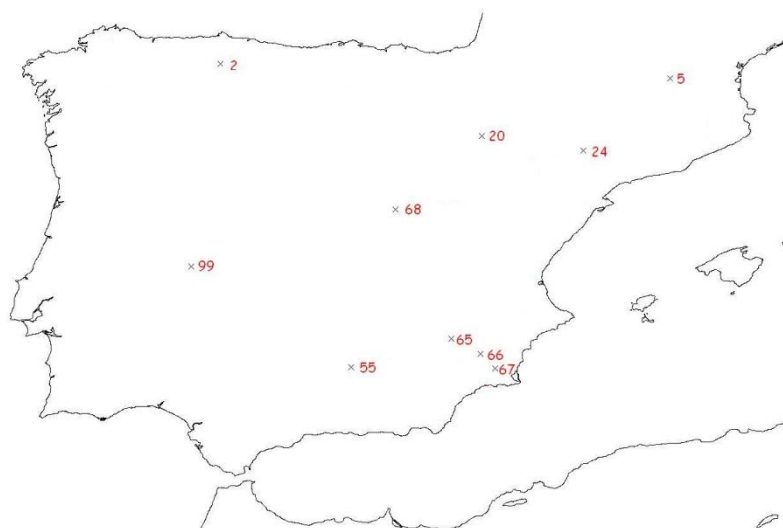


*Distribución espacial de estaciones pluviométricas en los Picos de Europa, sobre un MDE.*

## 4.2 RACHAS SECAS

En éste apartado se presentan los resultados del análisis de frecuencia y magnitud de rachas secas, obtenidos para los tres modelos analizados (HIRHAM, RCA, y RegCM), así como su ajuste a la realidad. Para la identificación de las rachas secas se han considerado umbrales de precipitación de 1 y 10 mm, y duración de rachas de 1 día, 7 días y 30 días. Se presentan los resultados obtenidos para los puntos 2, 5, 20, 24, 55, 65, 66, 67, 68, y 99. Las gráficas correspondientes al resto de puntos analizados, se presentan en formato digital en el CD del PFC.

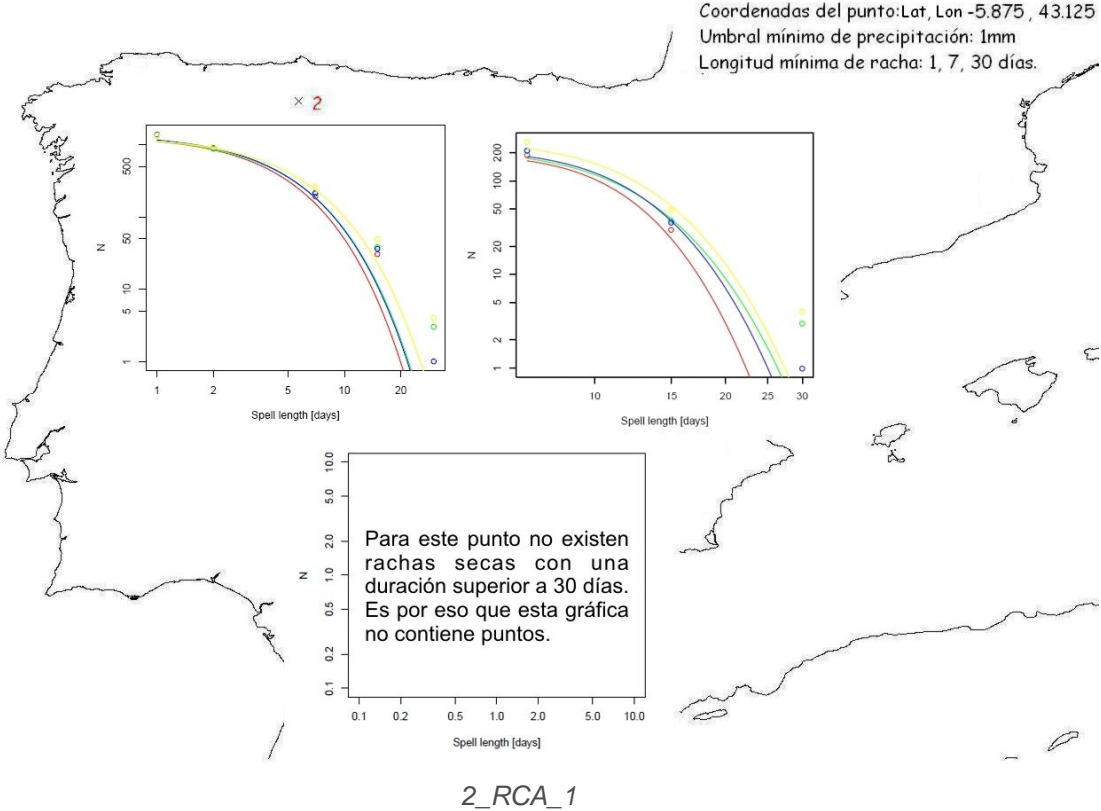
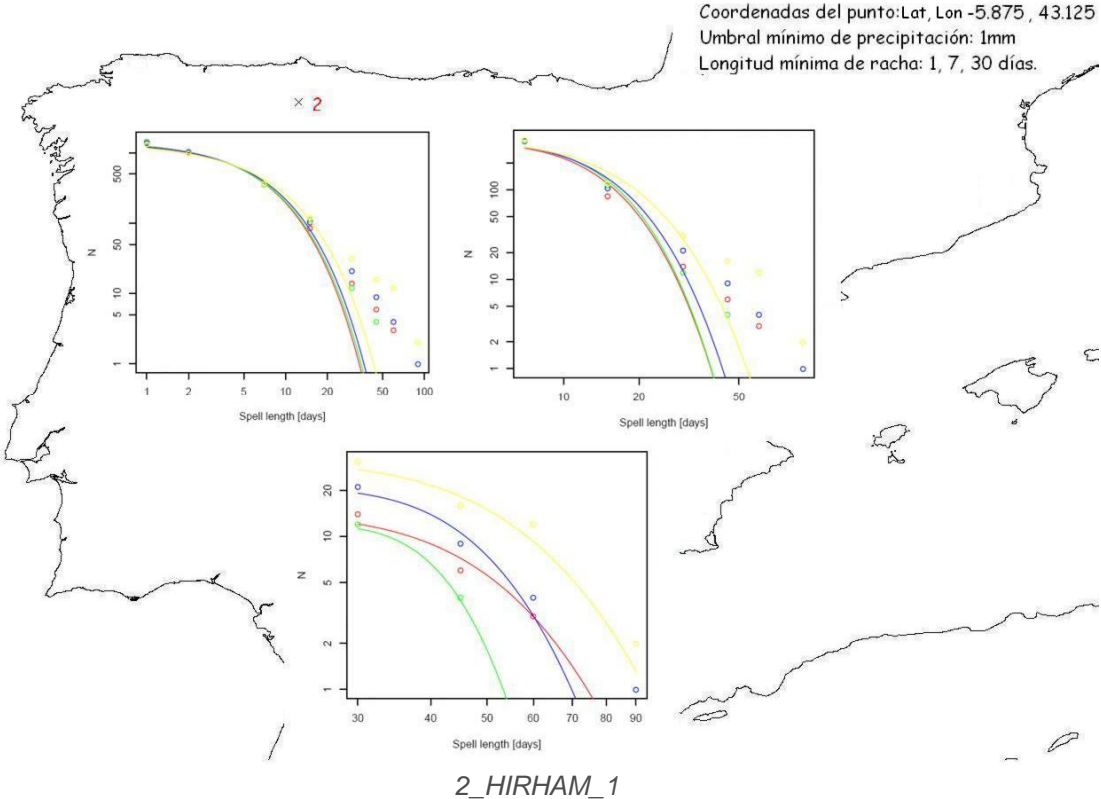
Los colores de las curvas representan los distintos períodos temporales: rojo 1961-1990, verde: 1991-2020, azul: 2021-2050 y amarillo: 2051-2080.



*Fig. 4.17. Puntos estudiados*



Para el **PUNTO 2**, las gráficas para los tres modelos analizados se presentan en las Figuras 4.18 y 4.19.



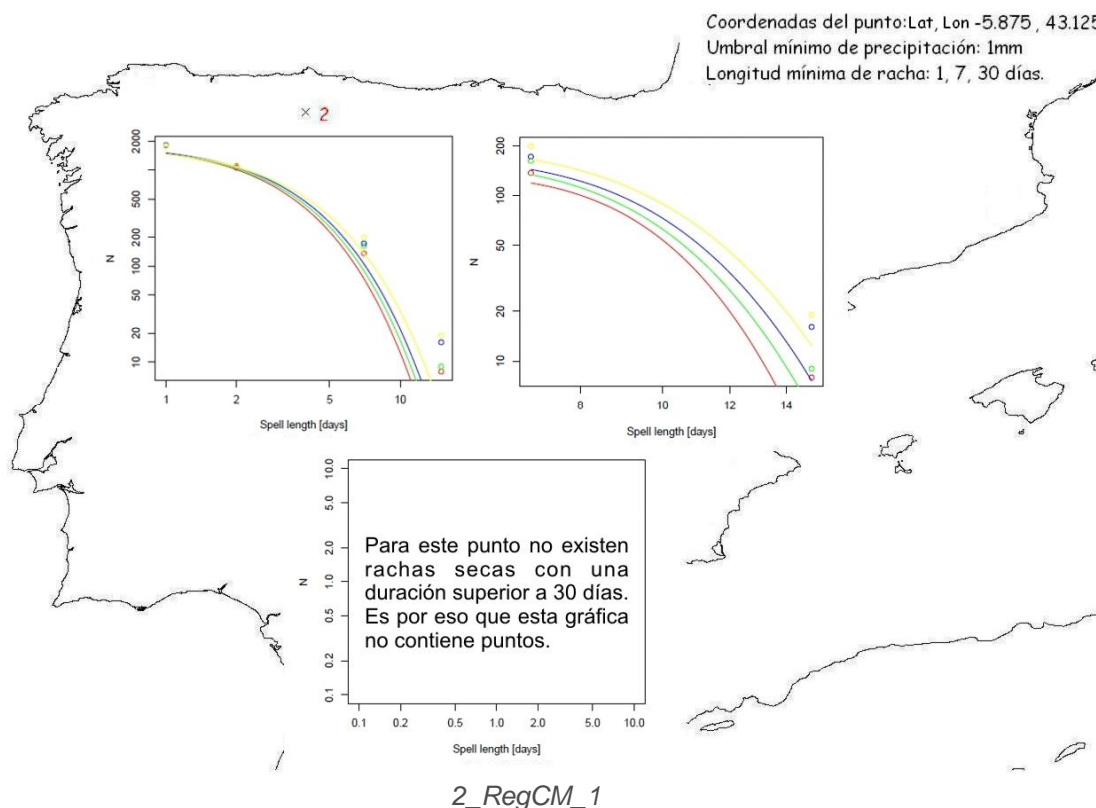
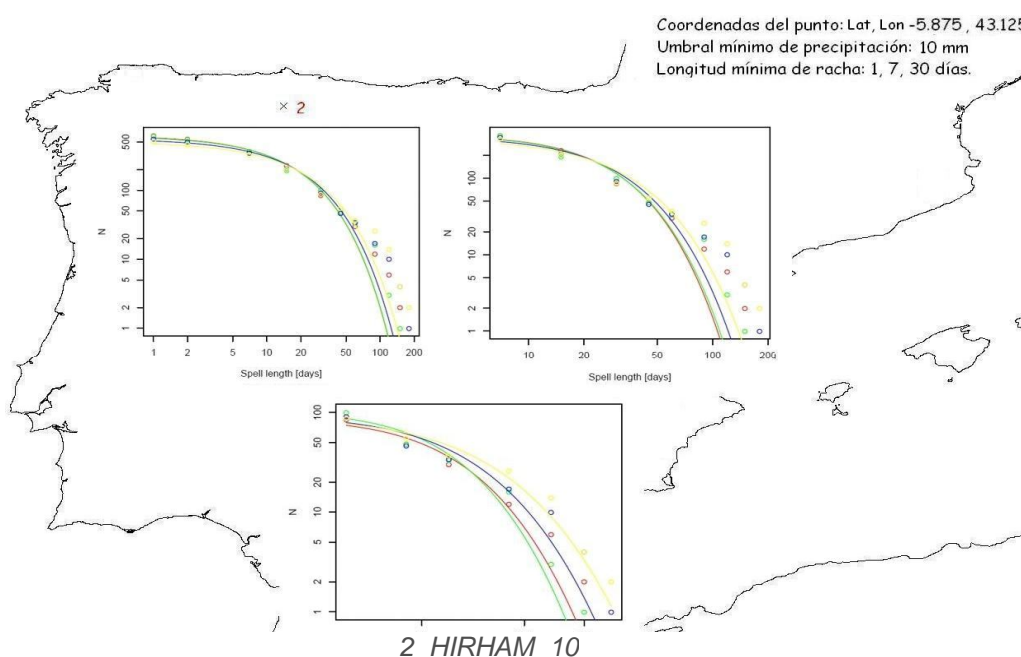


Fig. 4.18. 2\_1

Como se puede observar desde la *Figura 4.18* previa, para un umbral de precipitación mínimo de 1 mm, el modelo HIRHAM, predice rachas secas más largas que el modelo RCA, y este a su vez también predice rachas más largas que el modelo RegCM. Pero a pesar de ello, los tres modelos, en líneas generales, coinciden en que conforme se avance en el tiempo, la tendencia será de aumentar la frecuencia y magnitud de las rachas secas. Aún así las rachas secas previstas son de escasa longitud.



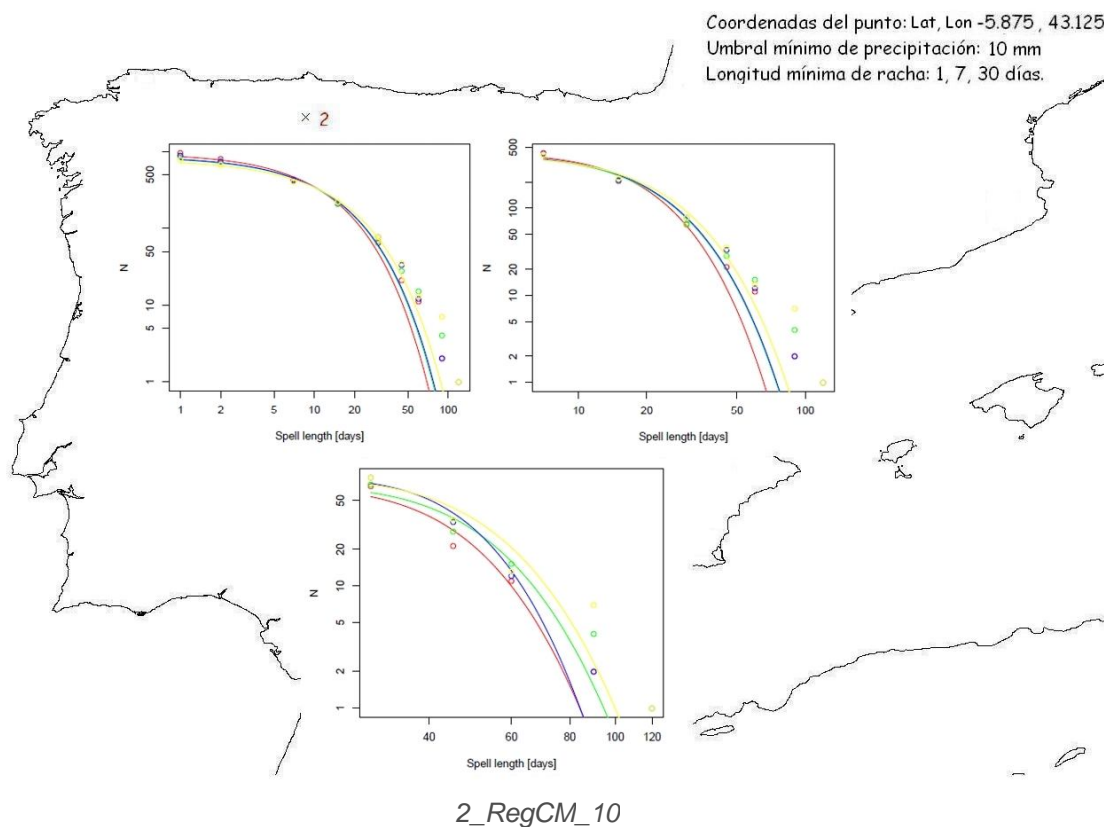
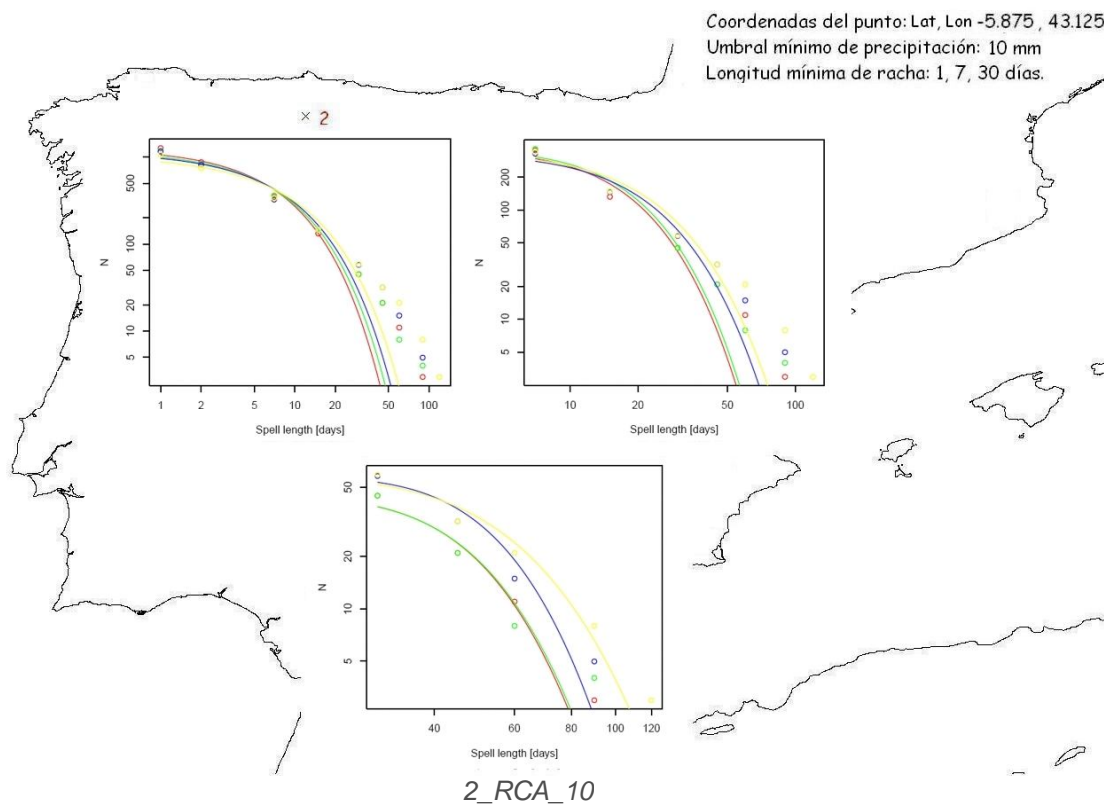


Fig. 4.19. 2\_10

Para un umbral mínimo de 10 mm, (Fig. 4.19) para este punto el modelo HIRHAM predice más rachas secas de mayor duración. En cambio, los modelos RCA y RegCM coinciden en la frecuencia y magnitud de las rachas. También al igual que para un umbral de precipitación mínimo de 1 mm, los tres modelos, en líneas generales,

coinciden en que a medida que se avance en el tiempo, la tendencia será de aumentar la frecuencia y magnitud de las rachas secas.

Para comprobar la verosimilitud de cada modelo así como comprobar que datos (RT2B o RT3) se ajustan más a la realidad, se han sacado los gráficos de las Fig 4.20 y 4.21

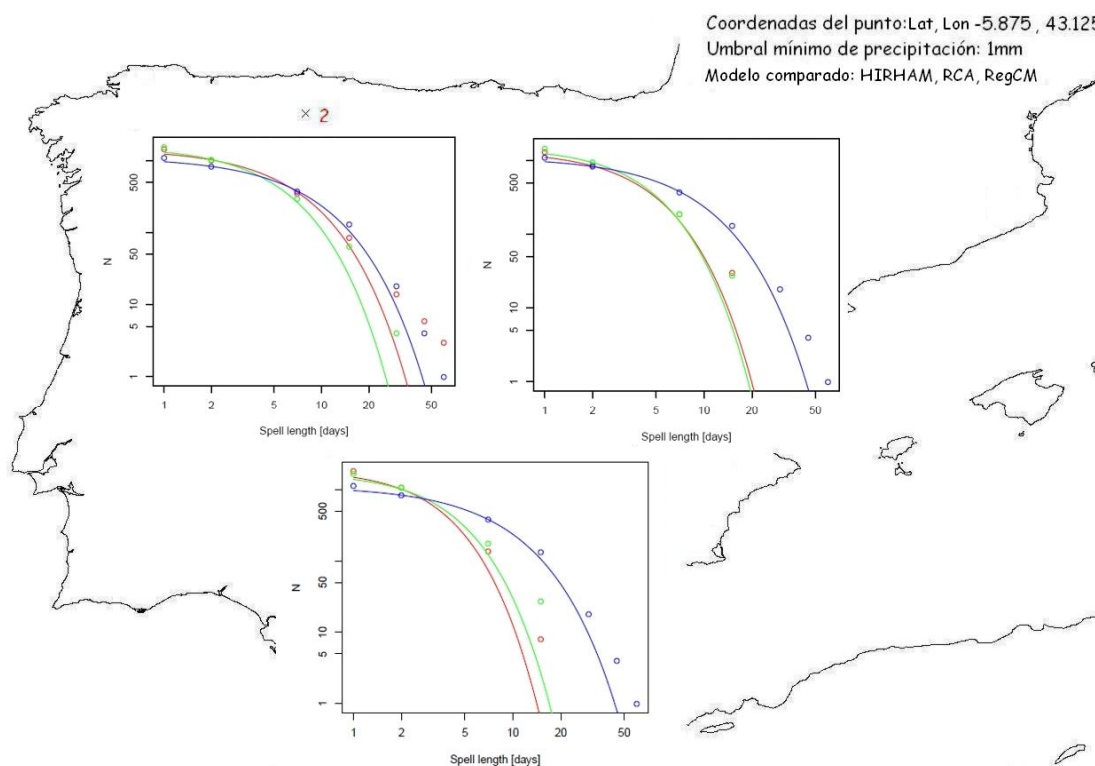


Fig.4.20. 2\_REALES\_Vs\_MODELOS\_1

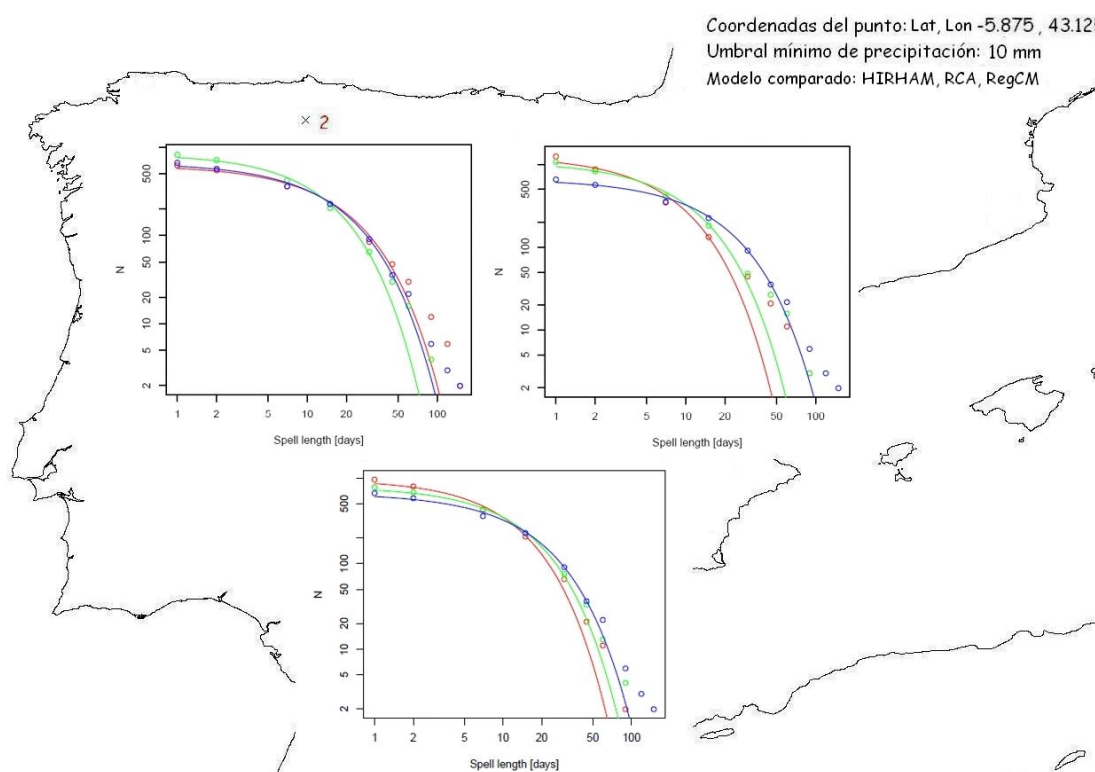
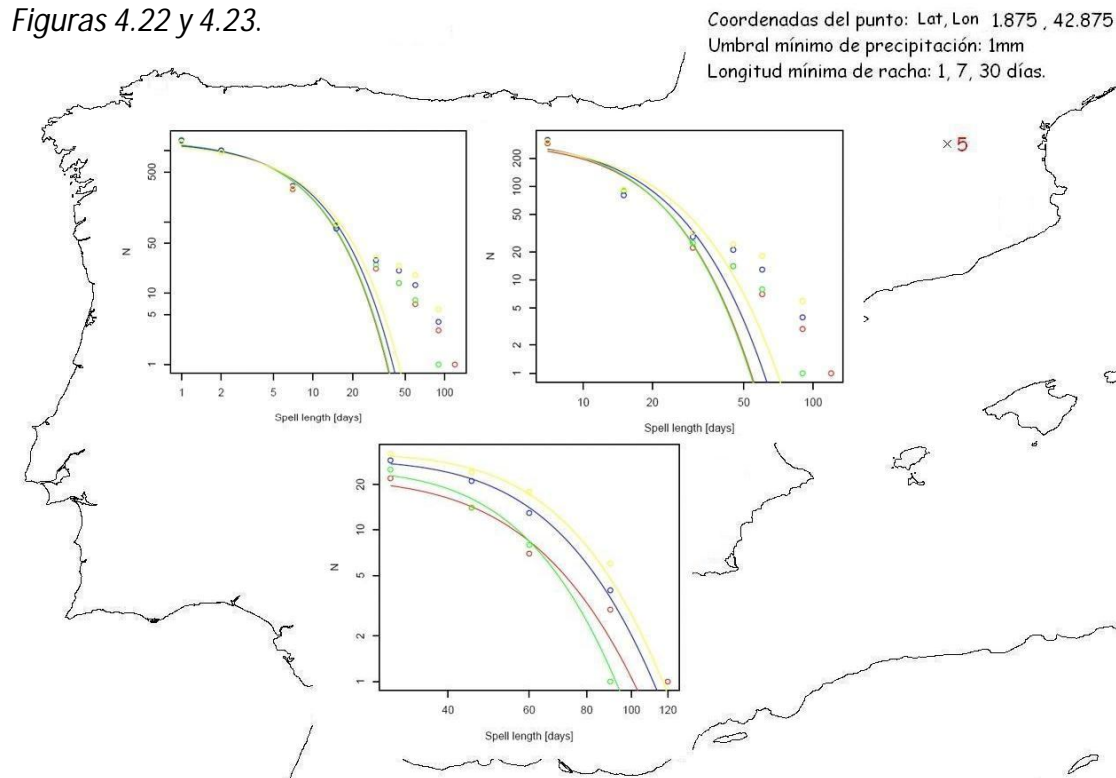


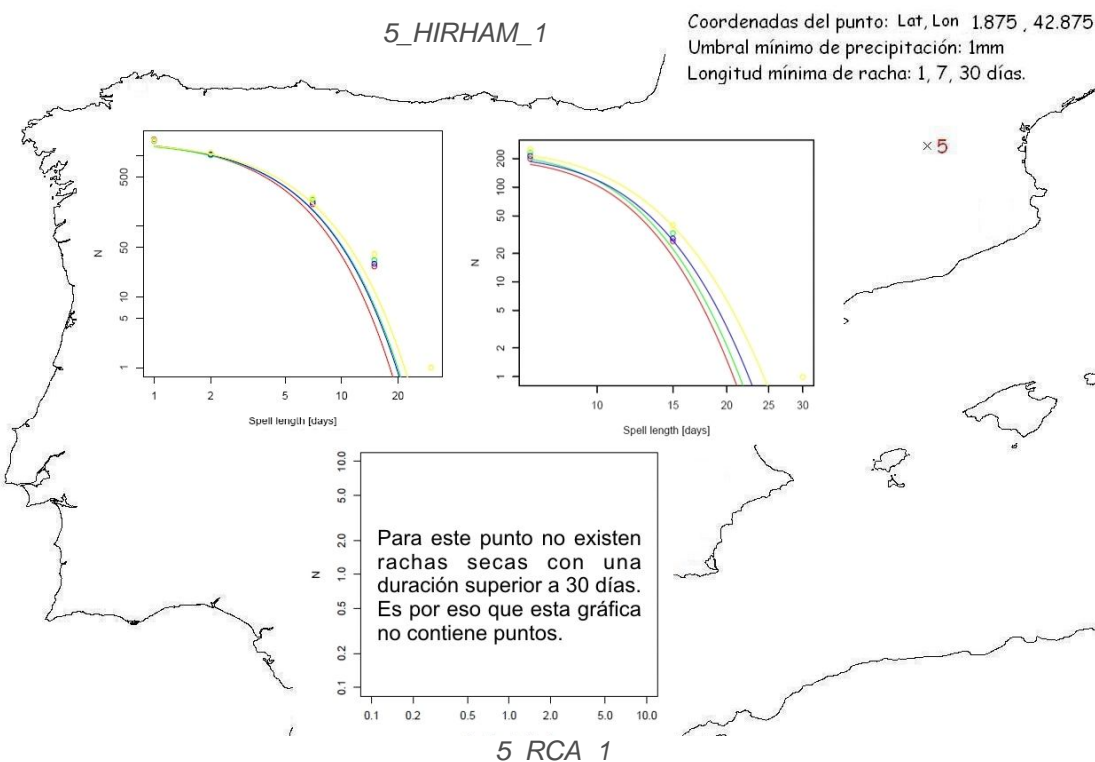
Fig. 4.21. 2\_REALES\_Vs\_MODELOS\_10

Tal y como puede observarse visualizando la cercanía de las curvas, recordando que la curva azul corresponde a los datos reales, la roja a los procedentes de la línea de investigación RT2B y la verde a los de la RT3, tanto para el umbral mínimo de precipitación de 1 mm como para el de 10 mm, los datos que más se ajustan a la realidad son los procedentes de la línea de investigación RT2B del modelo HIRHAM.

Para el **PUNTO 5**, las gráficas para los tres modelos analizados se presentan en las Figuras 4.22 y 4.23.



5\_HIRHAM\_1



5\_RCA\_1

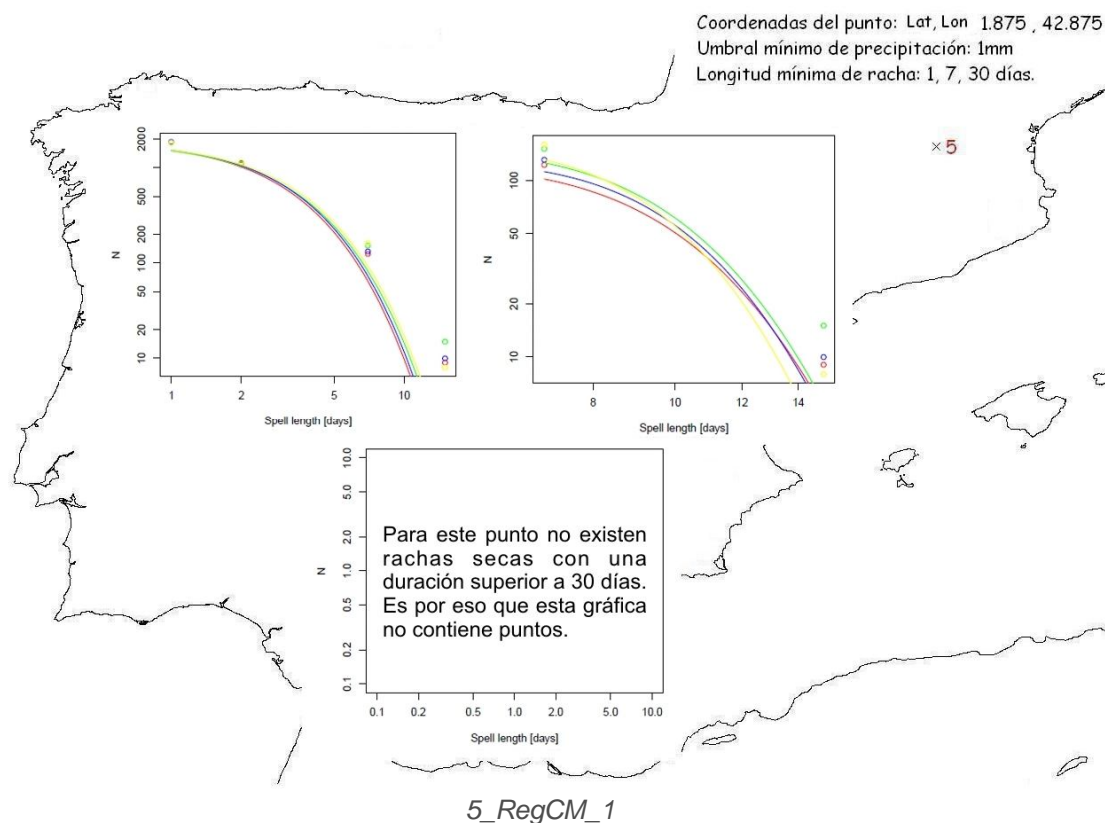
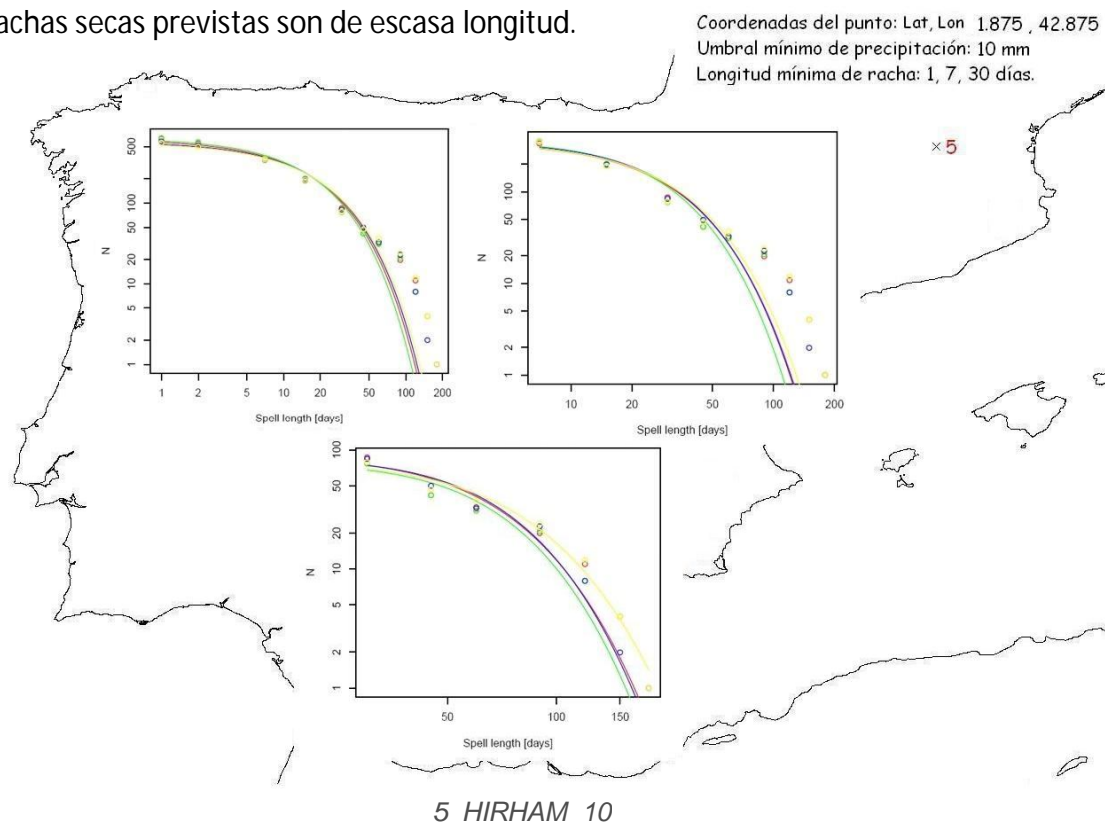
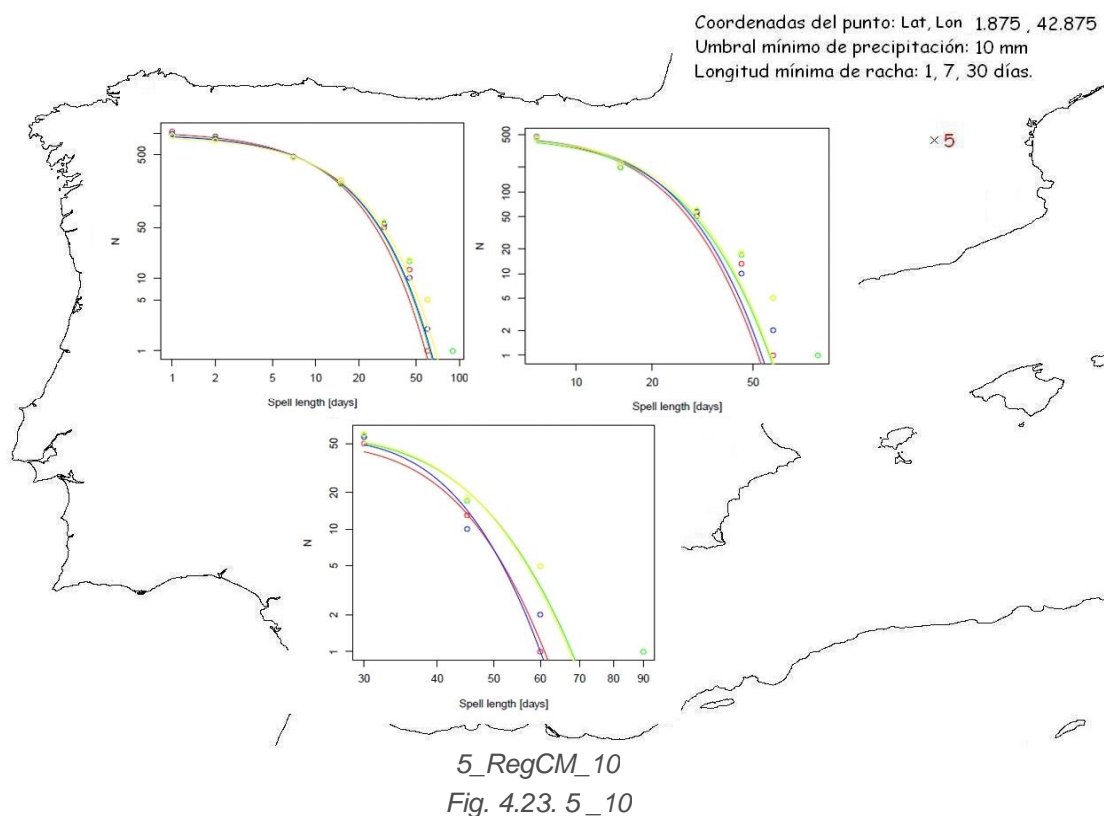
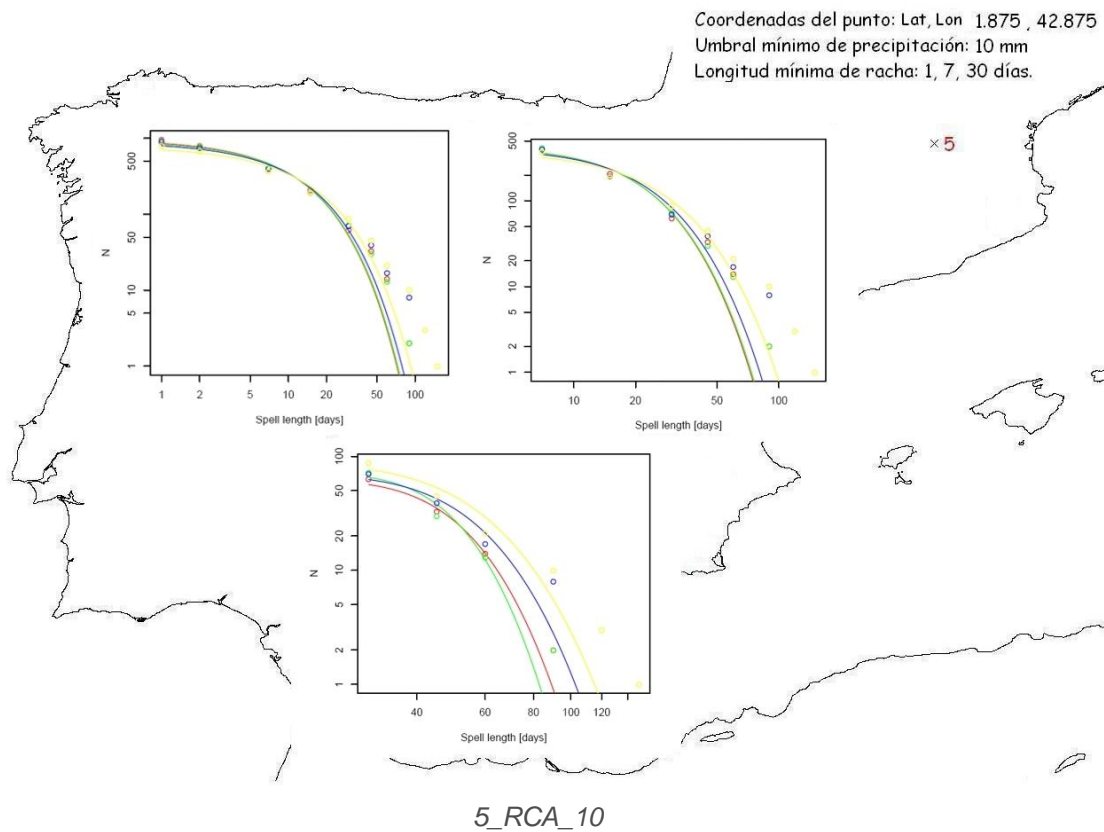


Fig. 4.22. 5\_1

Como se observa en la *Figura 4.22*, el modelo HIRHAM predice rachas secas de mayor duración, pero para este punto, los modelos HIRHAM y RCA predicen mayor frecuencia y magnitud de las rachas secas para periodos futuros, a diferencia del modelo RegCM que predice una frecuencia y magnitud similar para los distintos periodos excepto para el 1991-2020 en el que esa frecuencia y magnitud aumenta ligeramente. Aún así las rachas secas previstas son de escasa longitud.







Al igual que para el umbral mínimo de precipitación de 1 mm, el modelo HIRHAM predice rachas secas de mayor duración que los otros dos modelos (*Figura 4.23*). Por lo demás, los tres modelos coinciden en que en los cuatro períodos se presentarán rachas secas con una frecuencia y magnitud similar, con una ligera alternancia de períodos en los que esa frecuencia y magnitud sea algo más elevada.

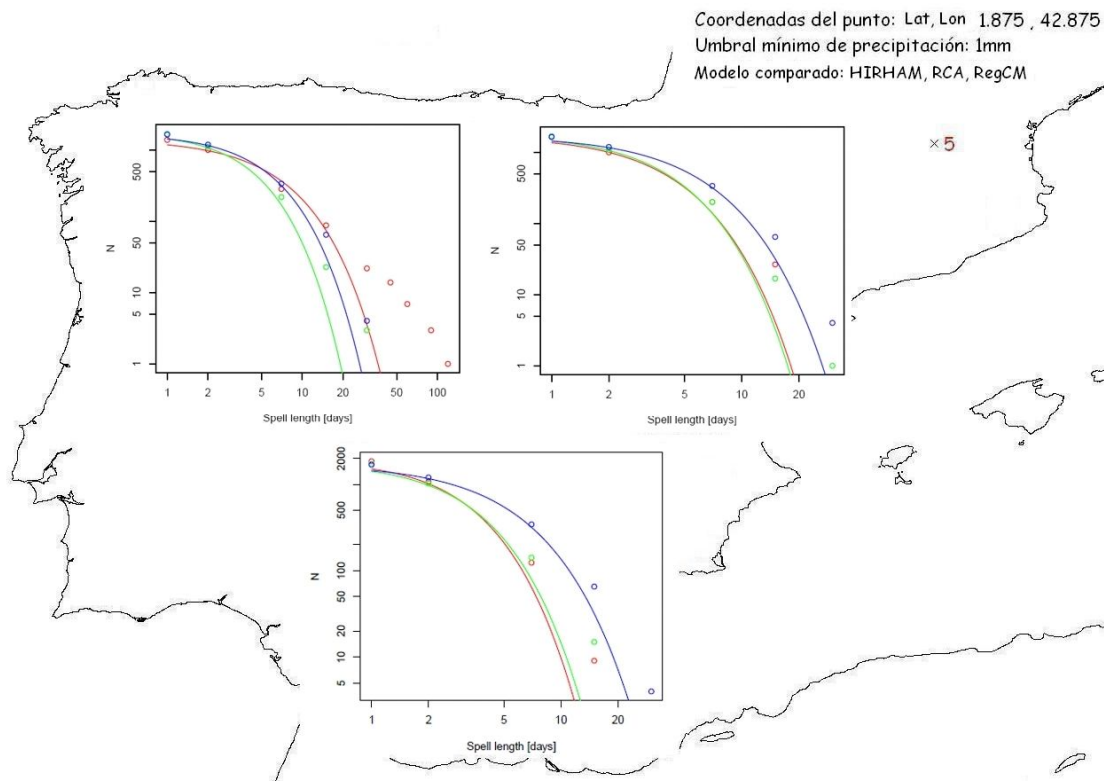


Fig. 4.24. 5\_REALES\_Vs\_MODELOS\_1

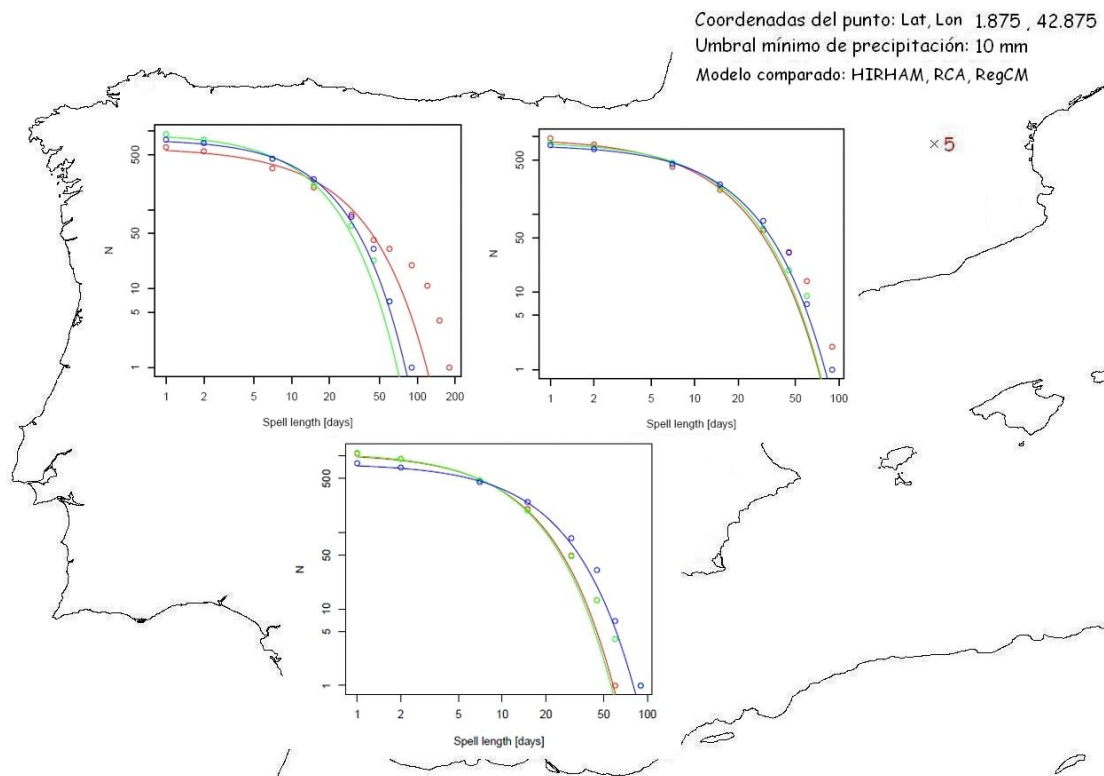
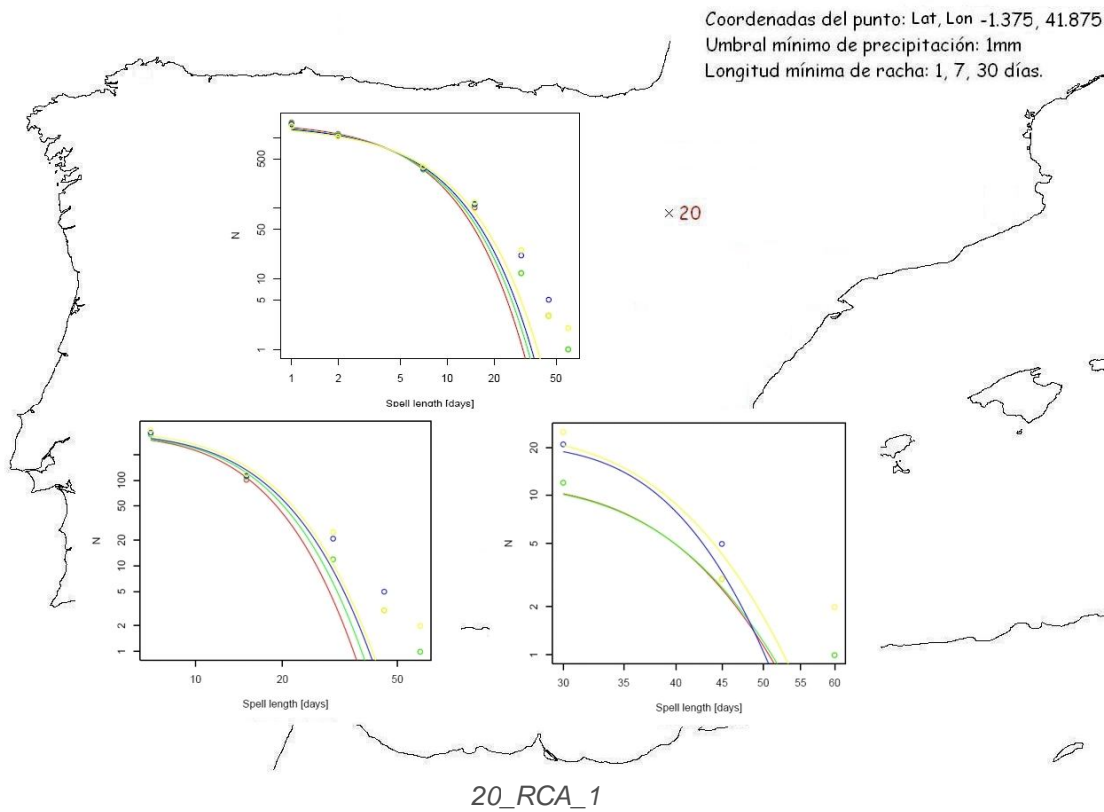
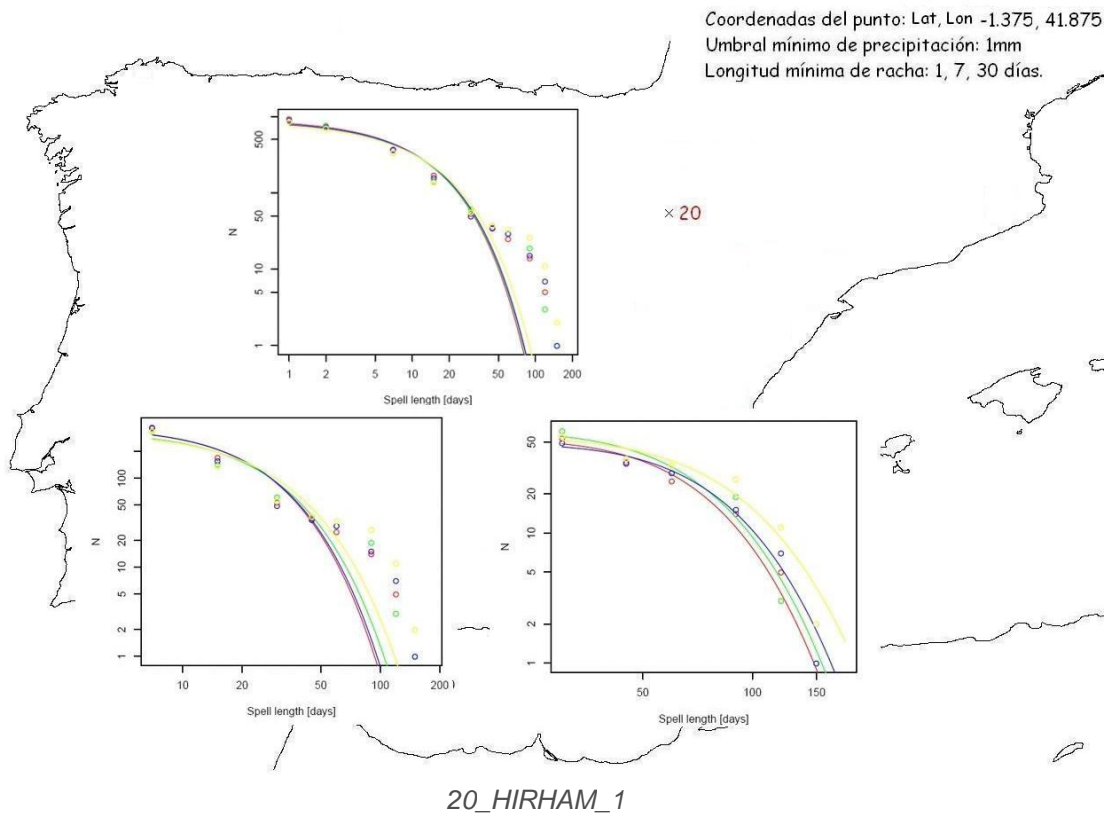


Fig. 4.25. 5\_REALES\_Vs\_MODELOS\_10

Para este punto, los datos que más se aproximan a la realidad (Figura 4.24 y 4.25) son los procedentes tanto de la línea de investigación RT2B como lo de la RT3 del modelo HIRHAM para un umbral de precipitación mínimo de 1mm, y los datos tanto los procedentes de la línea de investigación RT3 del modelo HIRHAM, como todos los datos del modelo RCA para un umbral de precipitación mínimo de 10 mm.



Los gráficos para los tres modelos analizados correspondientes al **PUNTO 20**, se muestran en las Figuras 4.26 y 4.27.



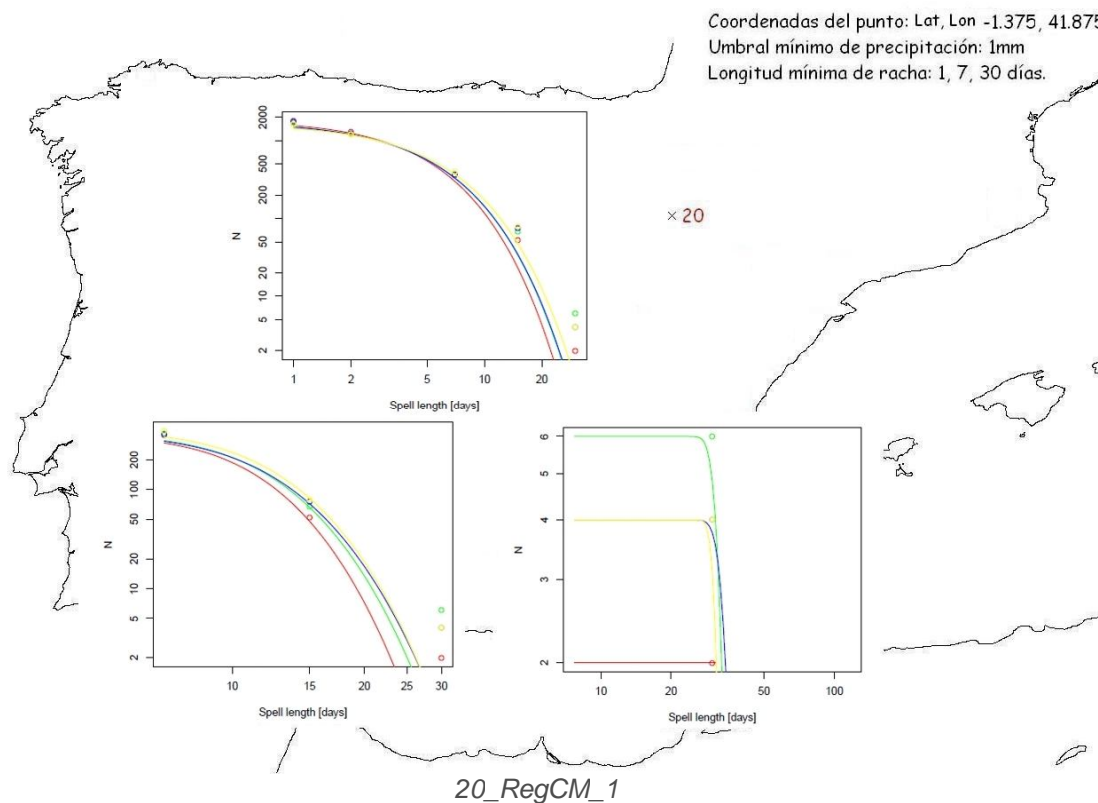
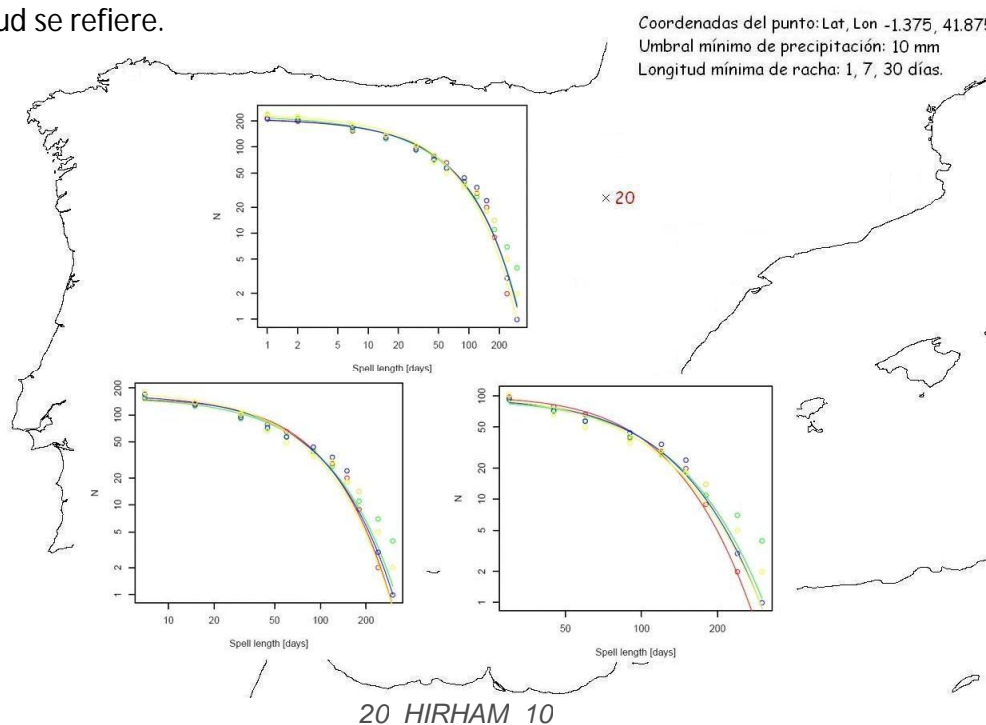
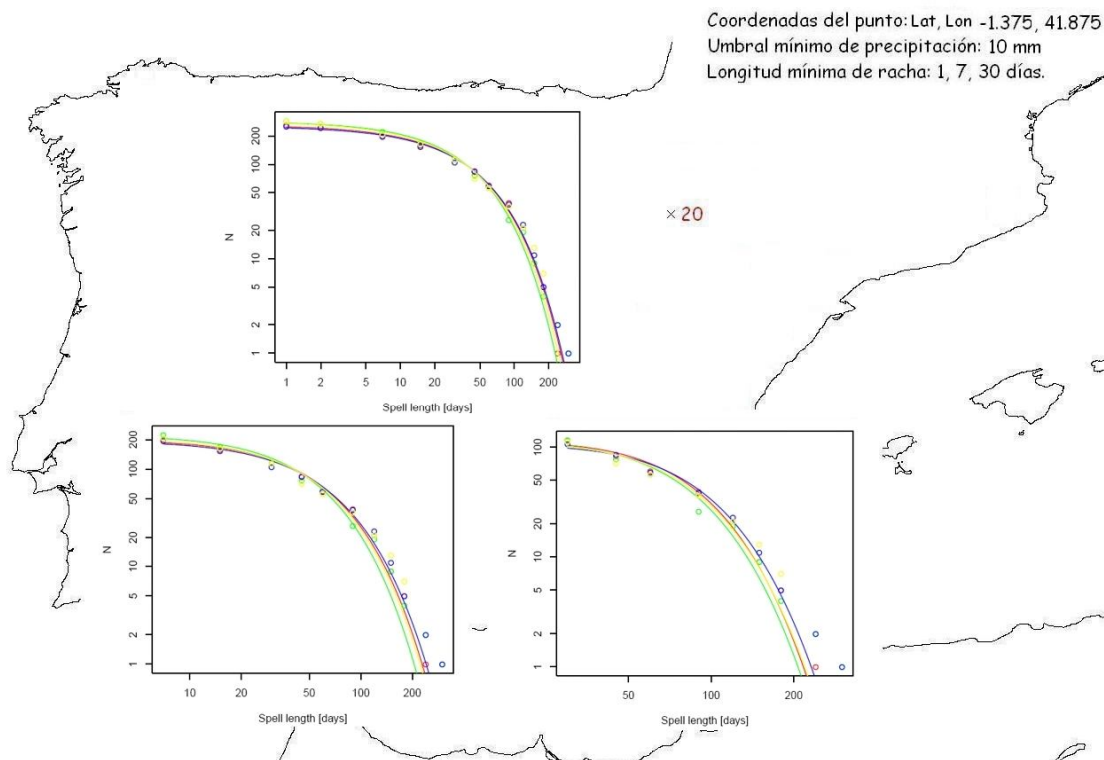


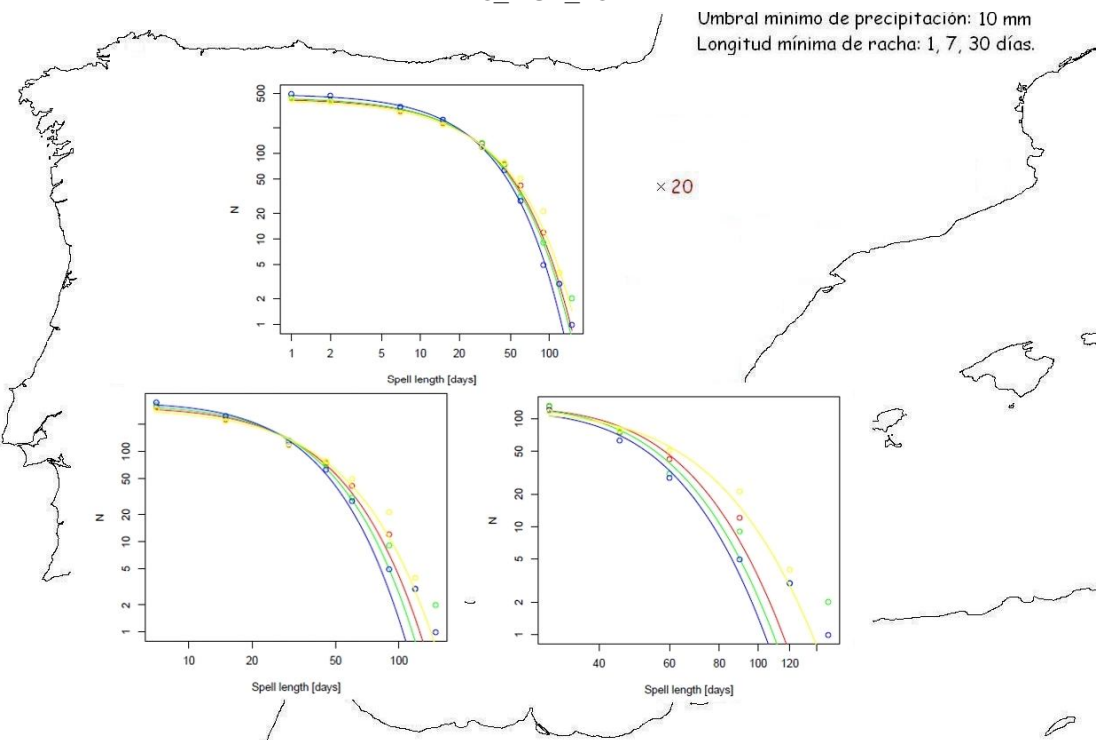
Fig. 4.26. 20\_1

Al igual que para los puntos anteriores el modelo HIRHAM predice rachas secas de mayor duración (hasta 150 días). También el modelo RCA predice rachas secas de una duración máxima algo superior al modelo RegCM (60 días para el modelo RCA y 30 días para el modelo RegCM) (Figura 4.26). Al margen de ello, los tres modelos coinciden en que los cuatro períodos tendrán rachas secas con una frecuencia y magnitud similar con una ligera tendencia a ir aumentando esa frecuencia y magnitud con el paso del tiempo. Aún así, las rachas secas previstas no son demasiado severas en cuanto a longitud se refiere.





20\_RCA\_10



20\_RegCM\_10

Fig. 4.27. 20\_10

Para un umbral de precipitación mínimo de 10mm para el punto 20 (Figura 4.27), el modelo HIRHAM y RCA coinciden en la duración máxima de las rachas secas (200 días), siendo el modelo RegCM el que muestra valores algo inferiores (130 días). A pesar de esto, los tres modelos coinciden en que la frecuencia y magnitud de las rachas secas será similar para los cuatro períodos.

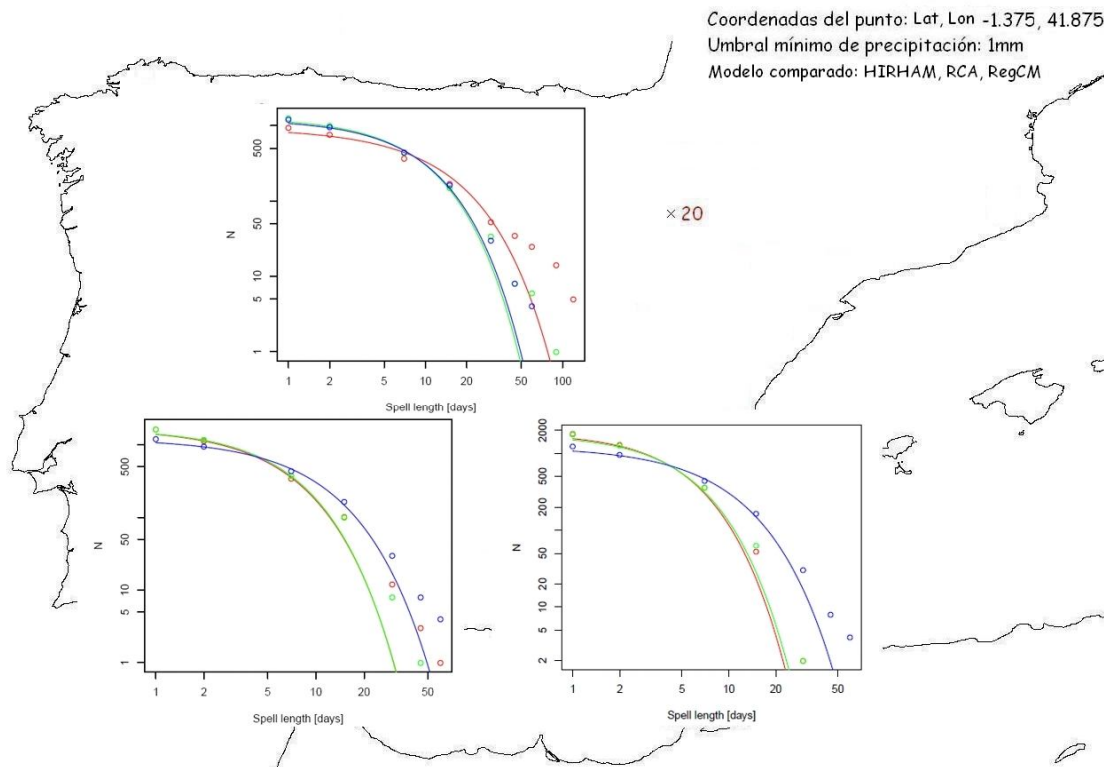


Fig. 4.28. 20\_REALES\_Vs\_MODELOS\_1

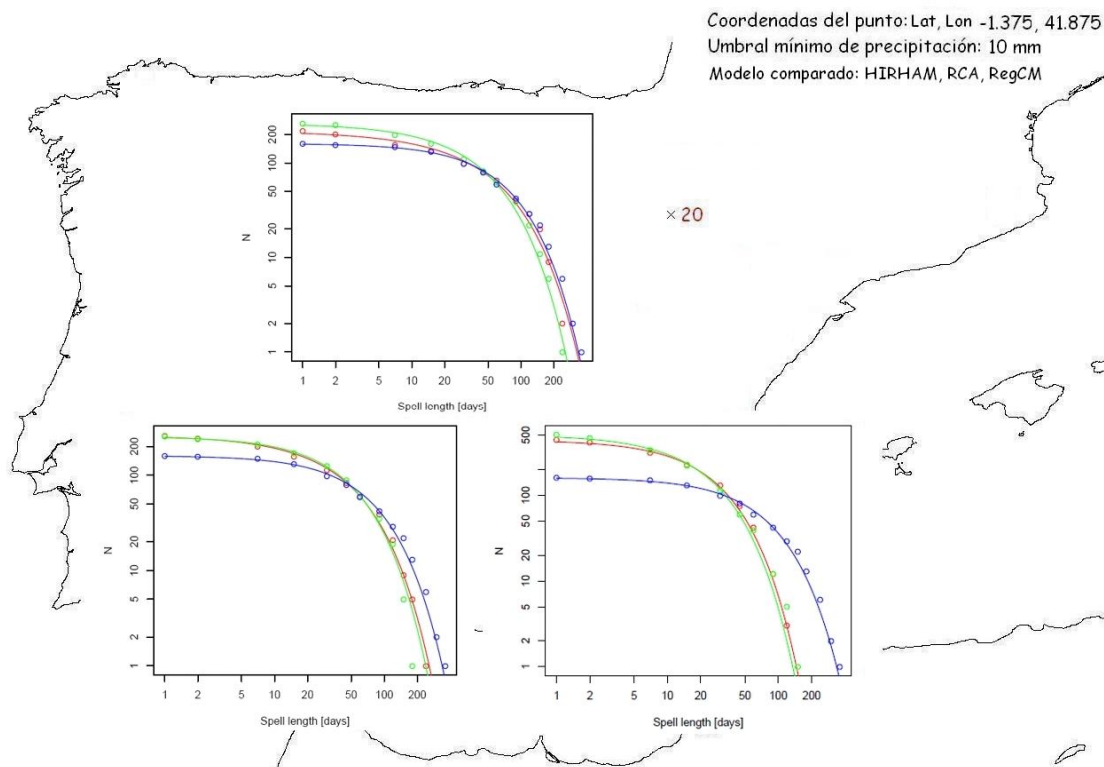
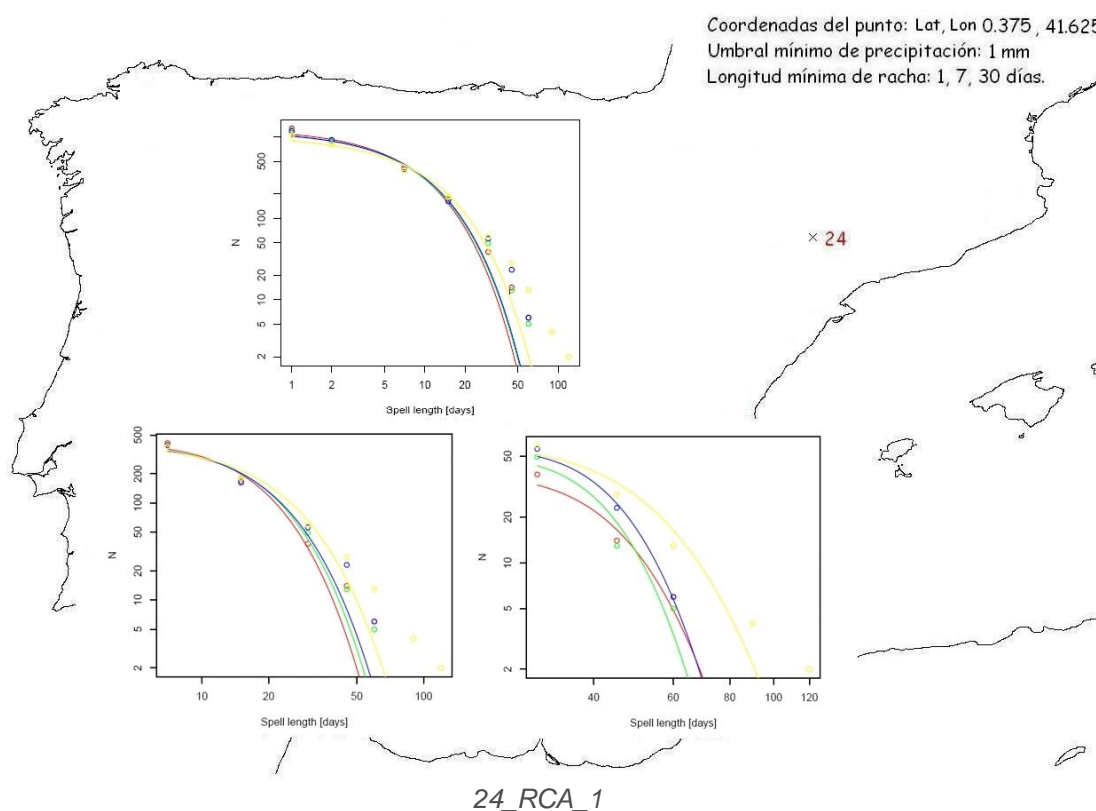
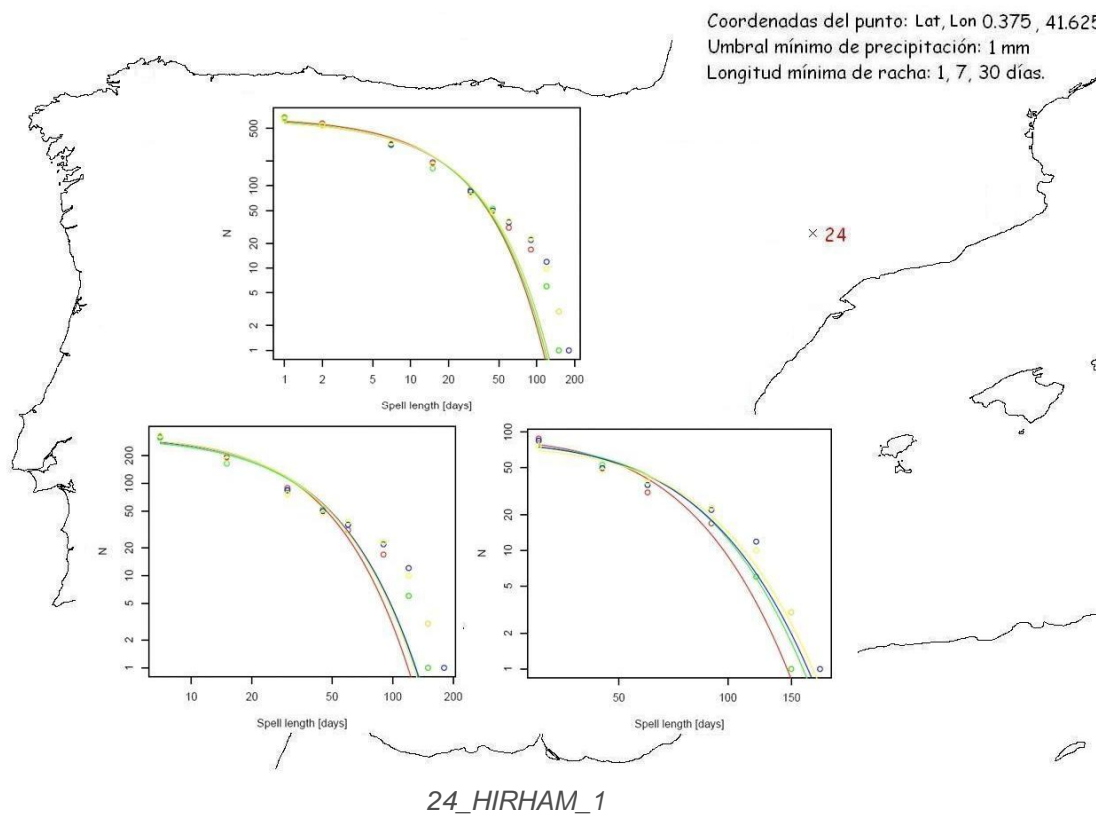


Fig. 4.29. 20\_REALES\_Vs\_MODELOS\_10

Para el punto 20, el los datos que mejor representan la realidad son los datos procedentes de línea de investigación RT3 del modelo HIRHAM para un umbral de precipitación mínimo de 1mm y los datos procedentes de la línea de investigación RT2B del modelo HIRHAM para un umbral de precipitación mínimo de 10mm. Tal y como se puede observar en las Figuras 4.28 y 4.29.

Al **PUNTO 24** le corresponden los gráficos que se muestran en las *Figuras 4.30 y 4.31*.



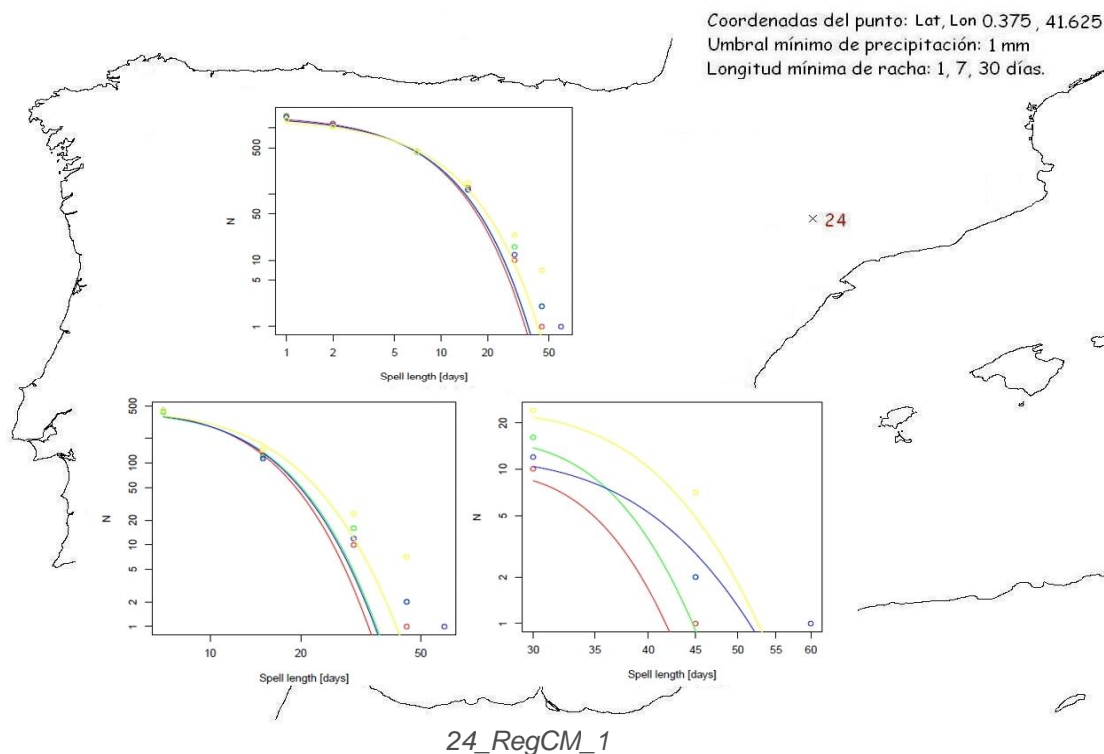
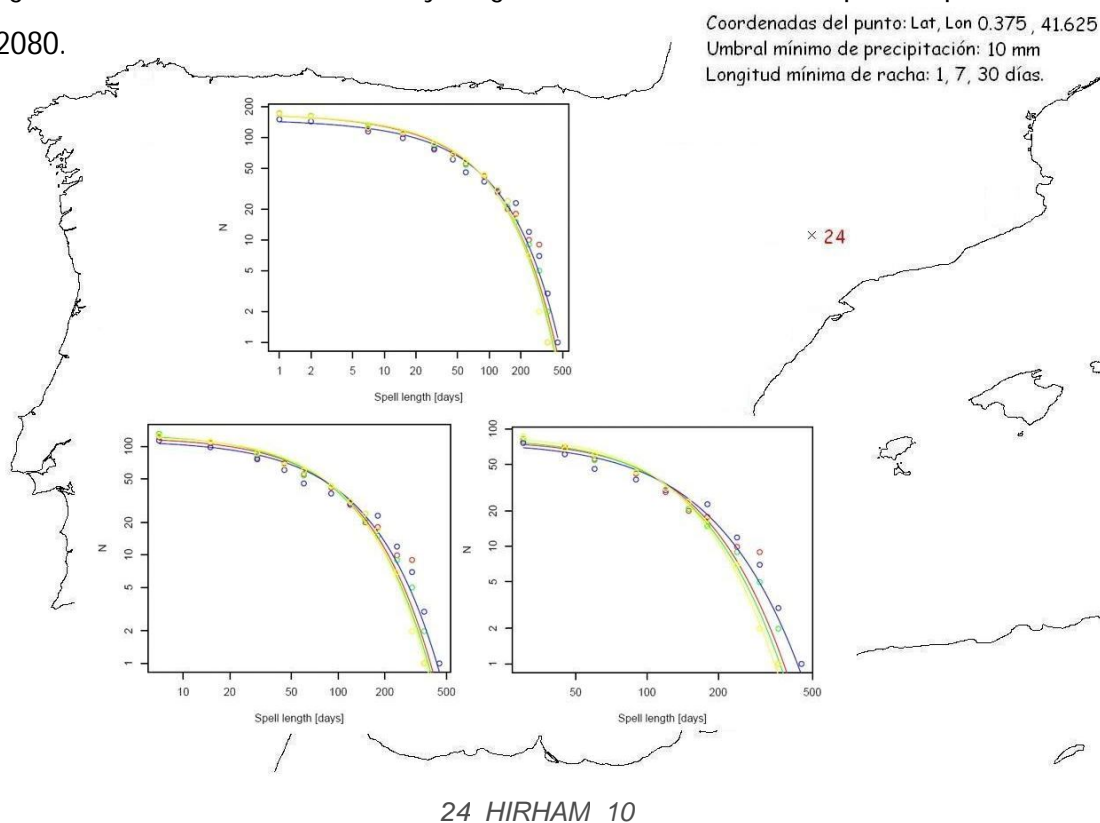
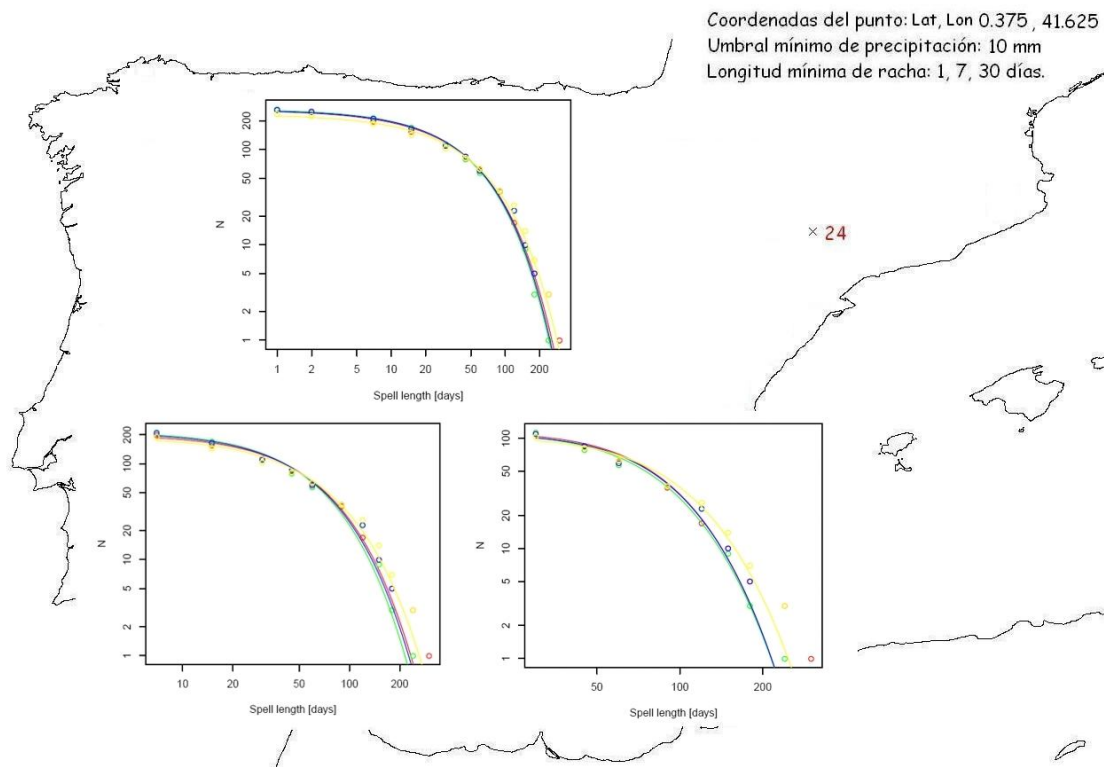


Fig. 4.30. 24 \_1

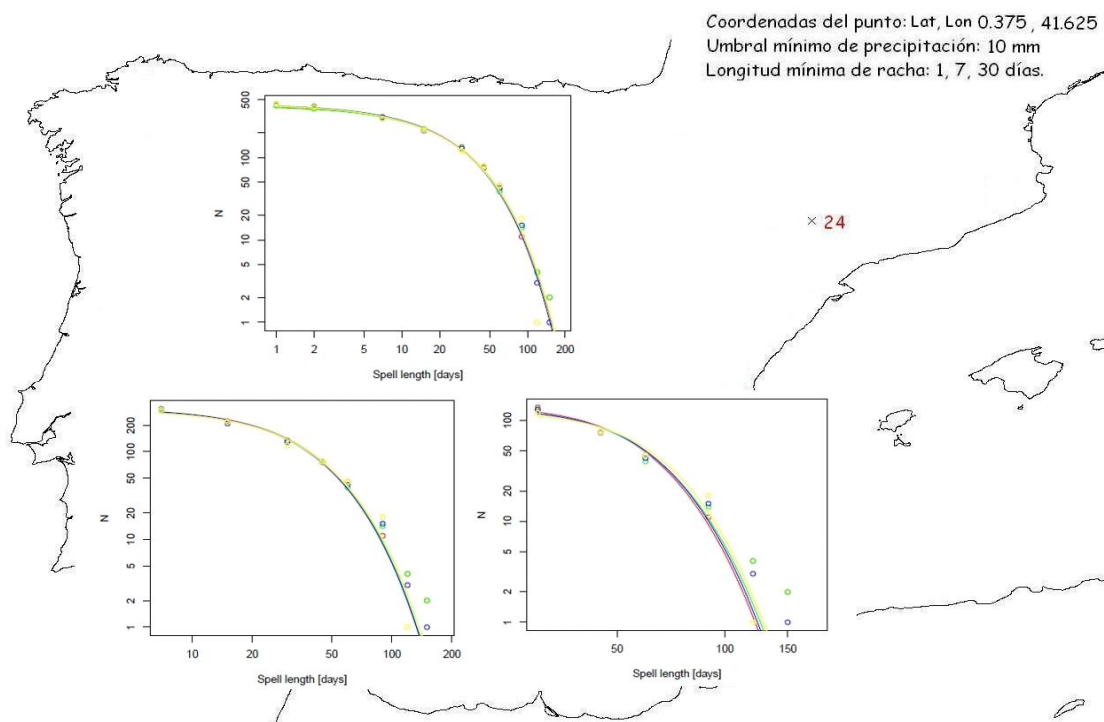
Como puede observarse en la figura previa, para este punto sucede igual que para el punto anterior en cuanto a duración máxima de rachas secas. El modelo HIRHAM, muestra una duración máxima mayor que el modelo RCA y este a su vez también muestra una duración máxima superior al modelo RegCM. En cuanto a frecuencia y magnitud de las rachas secas, el modelo HIRHAM predice una frecuencia y magnitud similar para los cuatro períodos, en cambio los modelos RCA y RegCM, muestran un ligero aumento en la frecuencia y magnitud de las rachas secas para el período 2051-2080.







24\_RCA\_10



24\_RegCM\_10

Fig. 4.31. 24\_10

En la figura previa, se observa que para un umbral de precipitación mínimo de 10 mm, aunque el modelo HIRHAM presente longitudes máximas de rachas secas mayores que los otros dos modelos, los tres modelos coinciden en que la frecuencia y magnitud de las rachas secas será similar para los cuatro períodos.

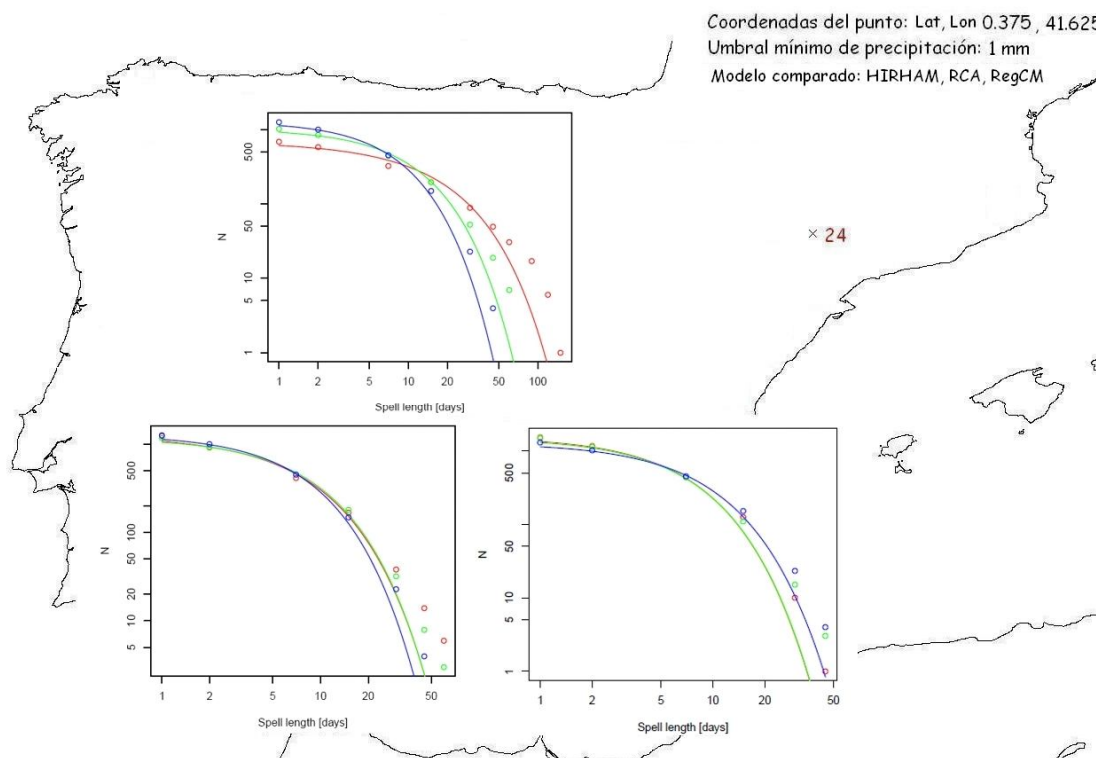


Fig. 4.32. 24\_REALES\_Vs\_MODELOS\_1

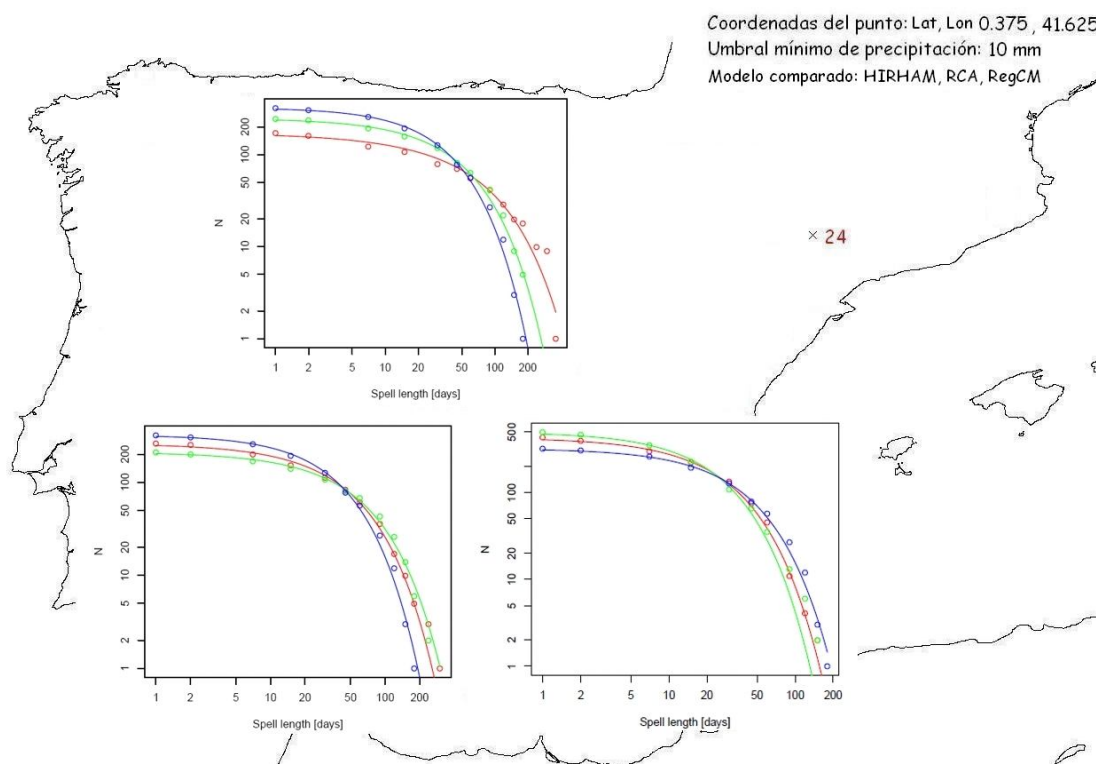
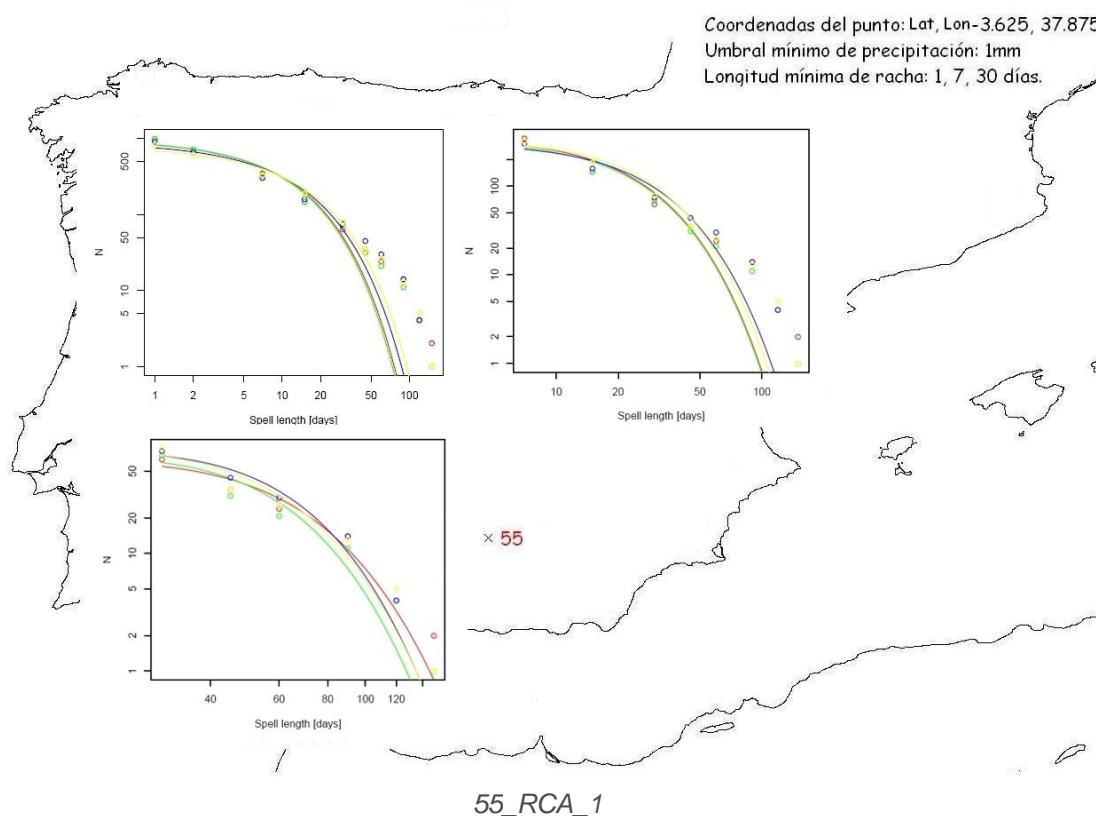
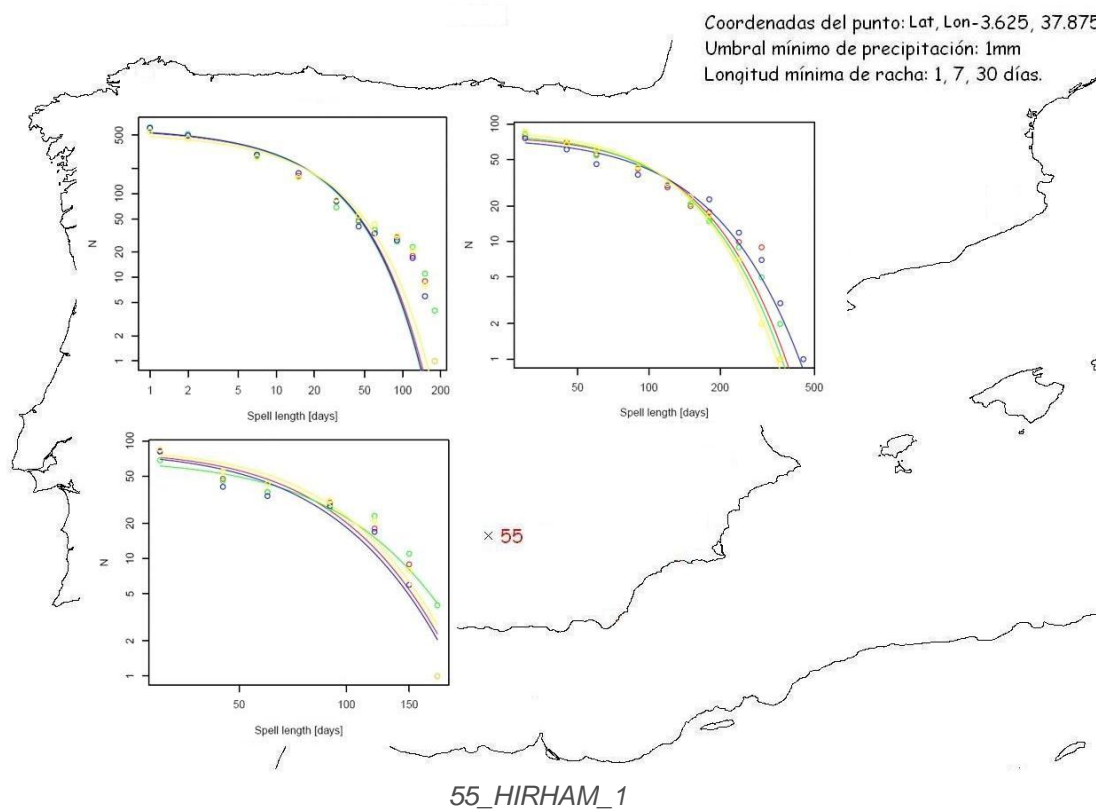


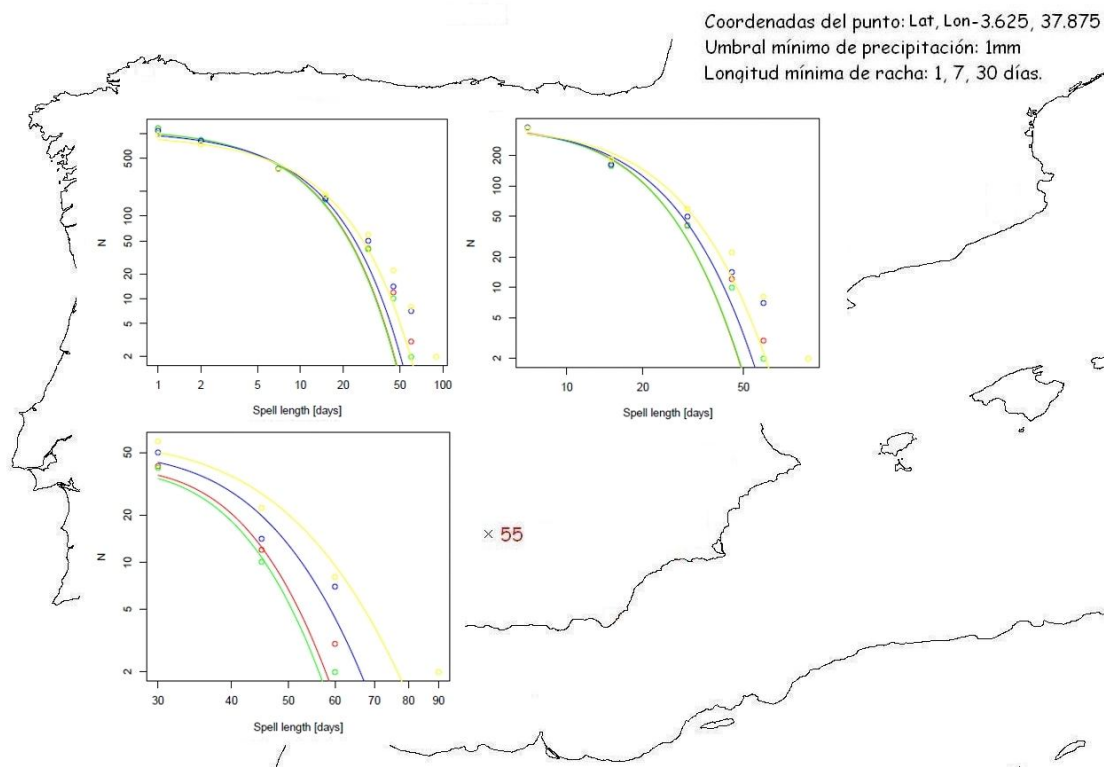
Fig. 4.33. 24\_REALES\_Vs\_MODELOS\_10

Para el punto 24, ninguna serie de datos se ajusta exactamente a la realidad, pero los datos que mejor parecen ajustarse a la realidad parecen ser tanto los de la línea de investigación RT2B como lo de RT3 de los modelos RCA y RegCM. (Figura 4.32 y 4.33)



Al **PUNTO 55** le corresponden los gráficos de las Figuras 4.34 y 4.35.

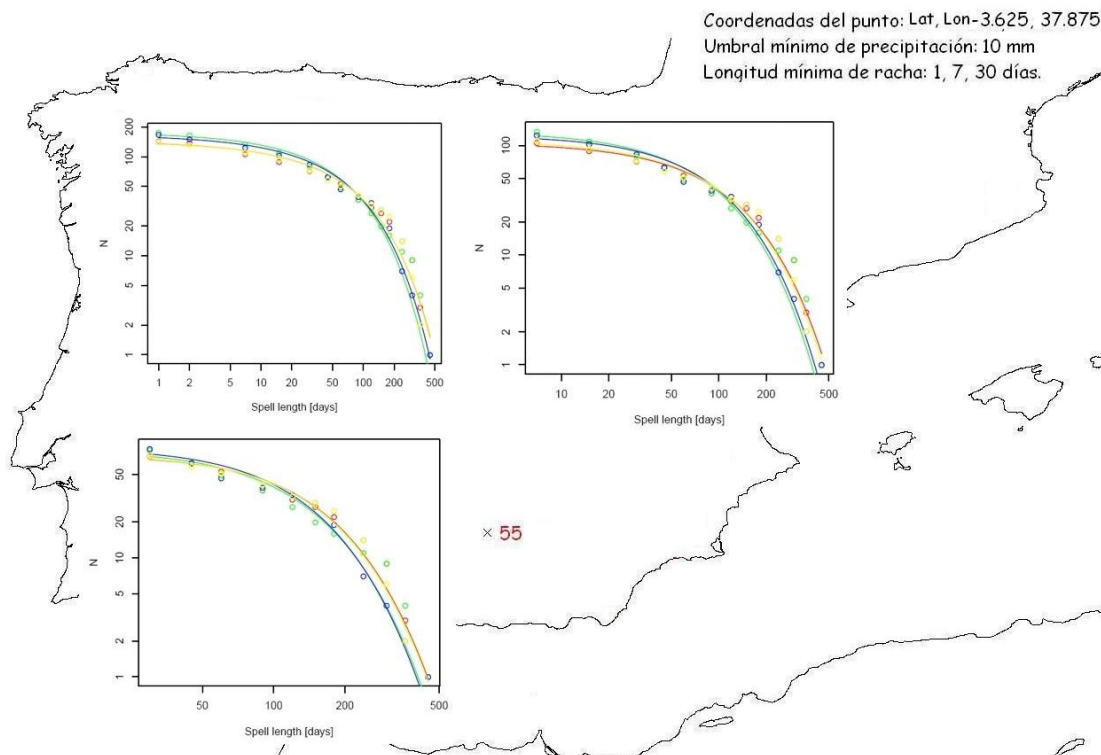




55\_RegCM\_1

Fig. 4.34. 55\_1

Al igual que para los puntos anteriores, el modelo HIRHAM predice rachas con una longitud máxima superior a los otros dos modelos. En cuanto a frecuencia y magnitud de las rachas se refiere, parece existir un ligero aumento en la frecuencia y magnitud de las rachas secas a medida que se avance en el tiempo. Este aumento se puede apreciar con más claridad en los gráficos del modelo RegCM. (Fig. 4.34)



55\_HIRHAM\_10

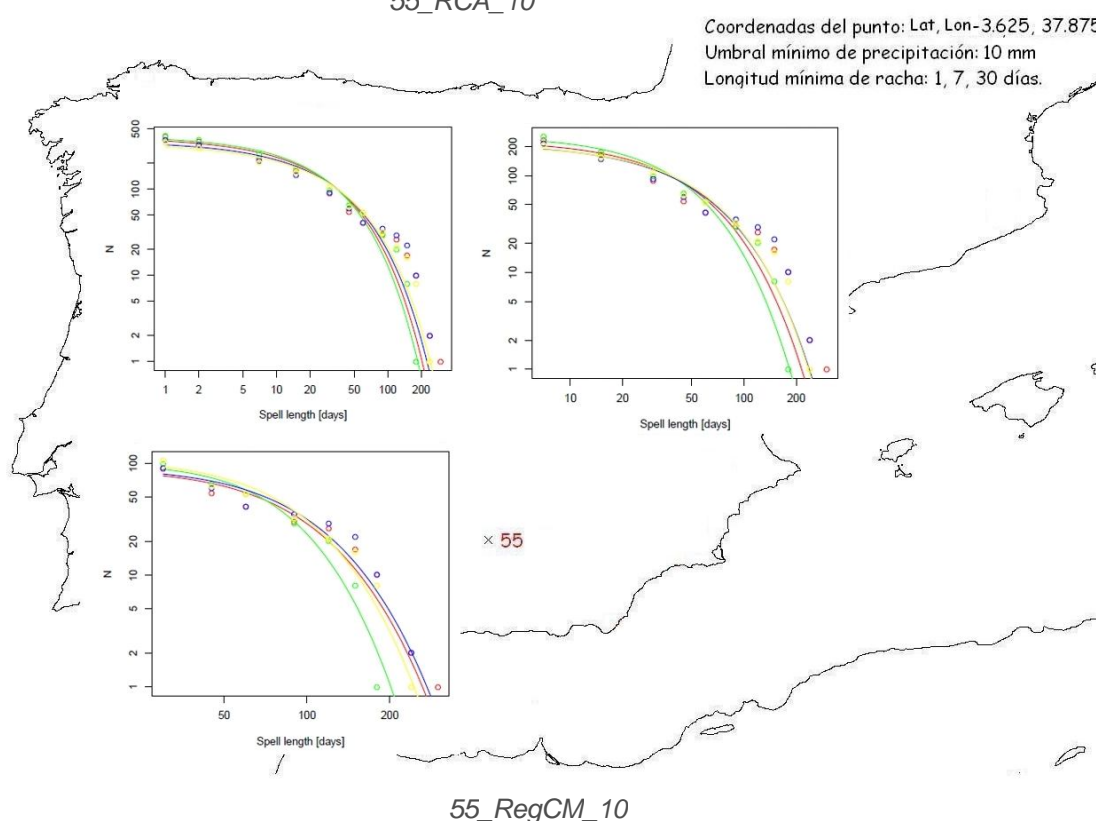
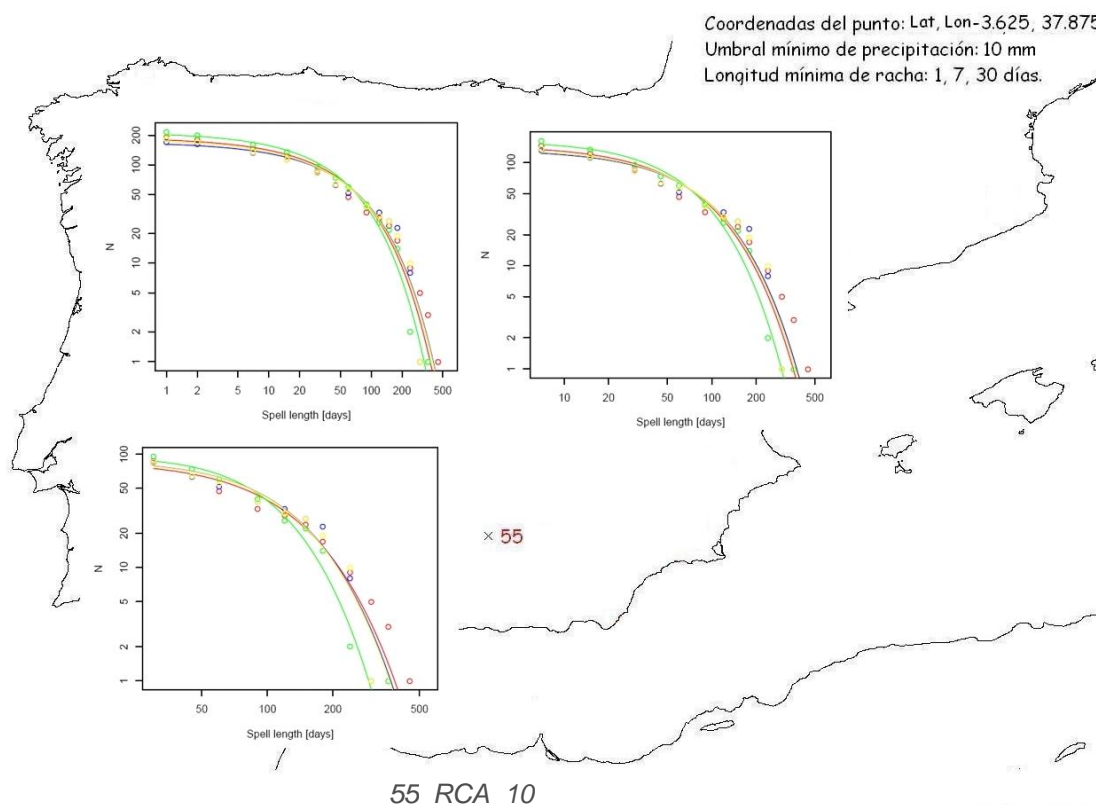


Fig. 4.35. 55\_10

En la figura previa se observa que para el umbral de precipitación mínimo de 10 mm, los modelos HIRHAM y RCA se comportan igual en la predicción de longitudes máximas de rachas secas y el modelo RegCM predice rachas con longitudes máximas bastante inferiores. En la predicción de la frecuencia y magnitud de las rachas, los tres modelos

se comportan de forma más o menos similar, prediciendo una frecuencia y magnitud de las rachas secas sin excesivas variaciones para los distintos períodos, a diferencia del período 1991-2020, que los modelos RCA y RegCM lo predicen algo menos severo en cuanto a la frecuencia y magnitud de rachas secas se refiere.

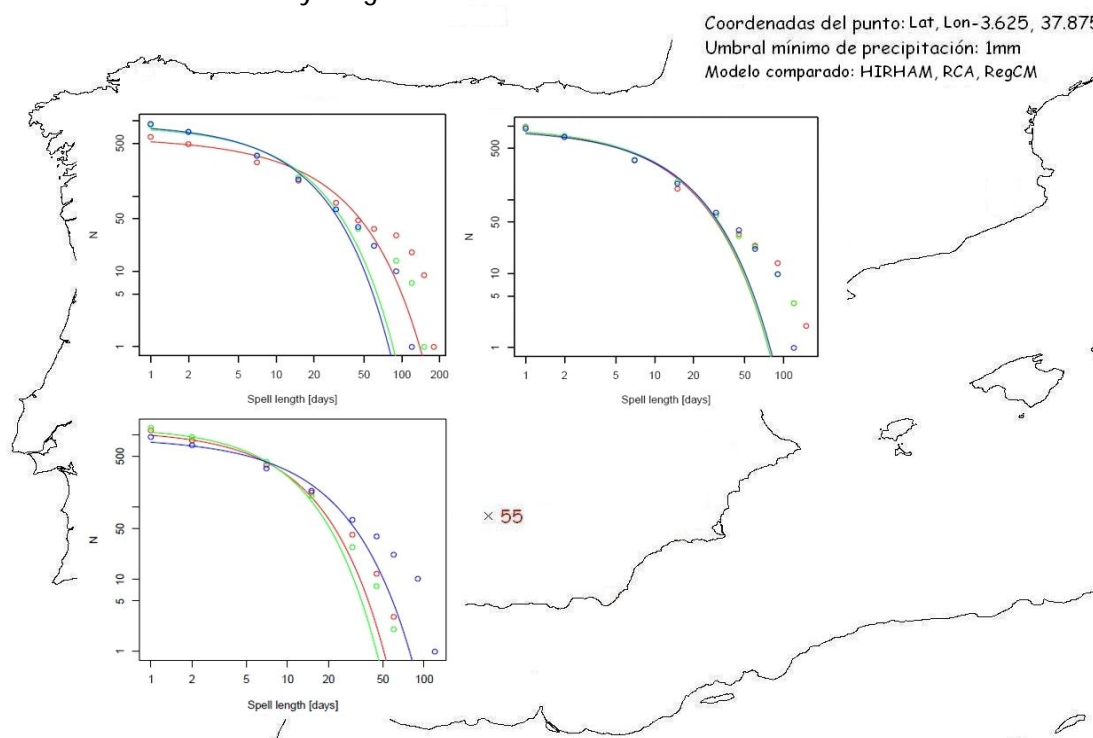


Fig. 4.36. 55\_REALES\_Vs\_MODELOS\_1

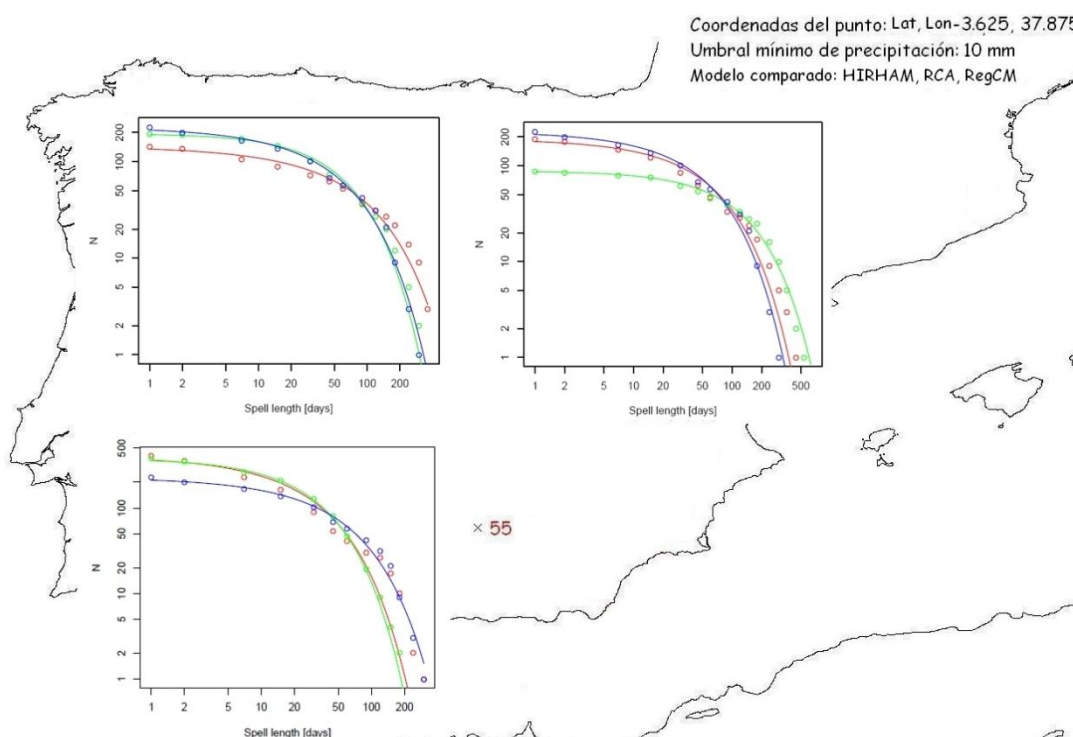
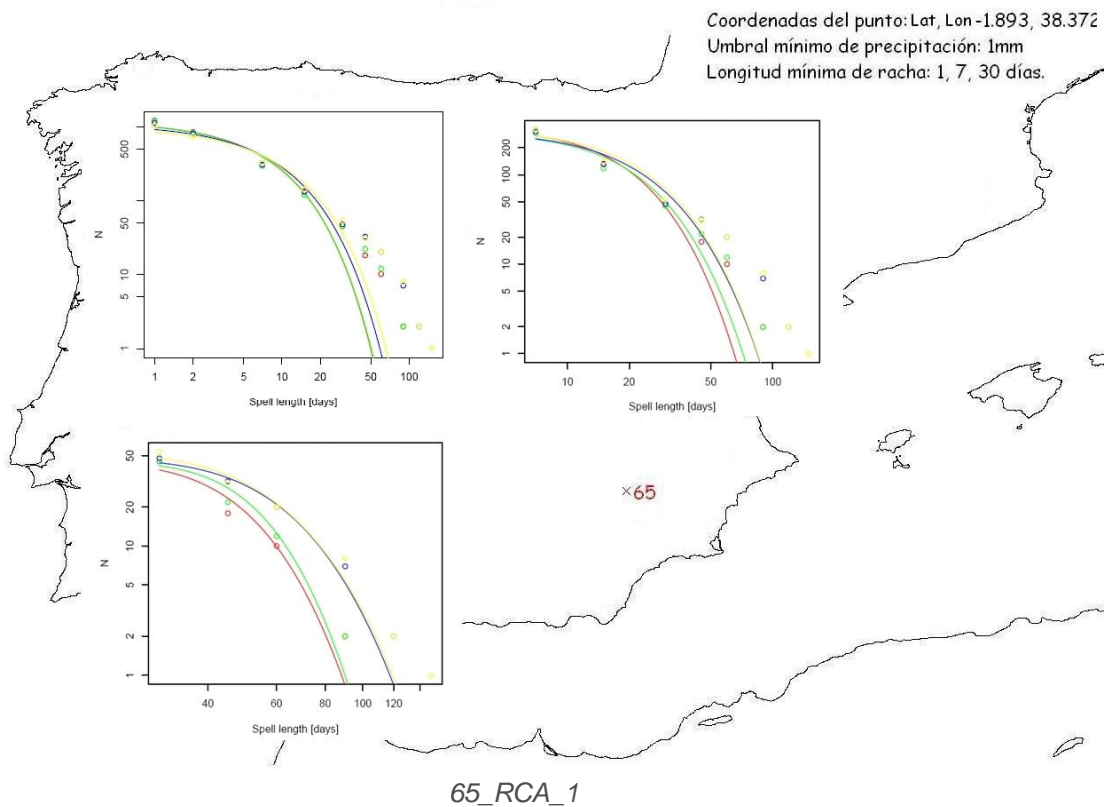
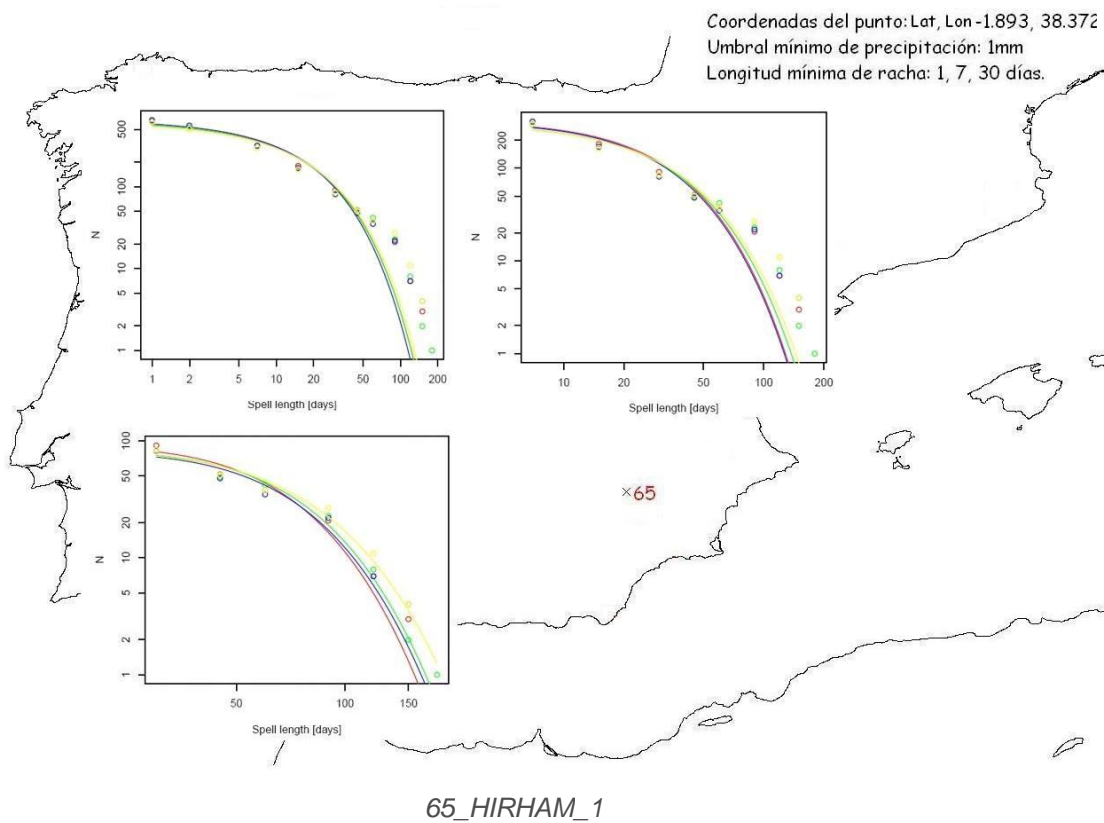


Fig. 4.37. 55\_REALES\_Vs\_MODELOS\_10

Como se observa en la *Figura 4.37*, para este punto, los datos que mejor se ajustan a la serie de datos reales son los pertenecientes a la línea de investigación RT3 del modelo HIRHAM, y los datos pertenecientes a las dos líneas de investigación del modelo RCA.

En las Figuras 4.38 y 4.39, se muestran los gráficos obtenidos para el **PUNTO 65**.



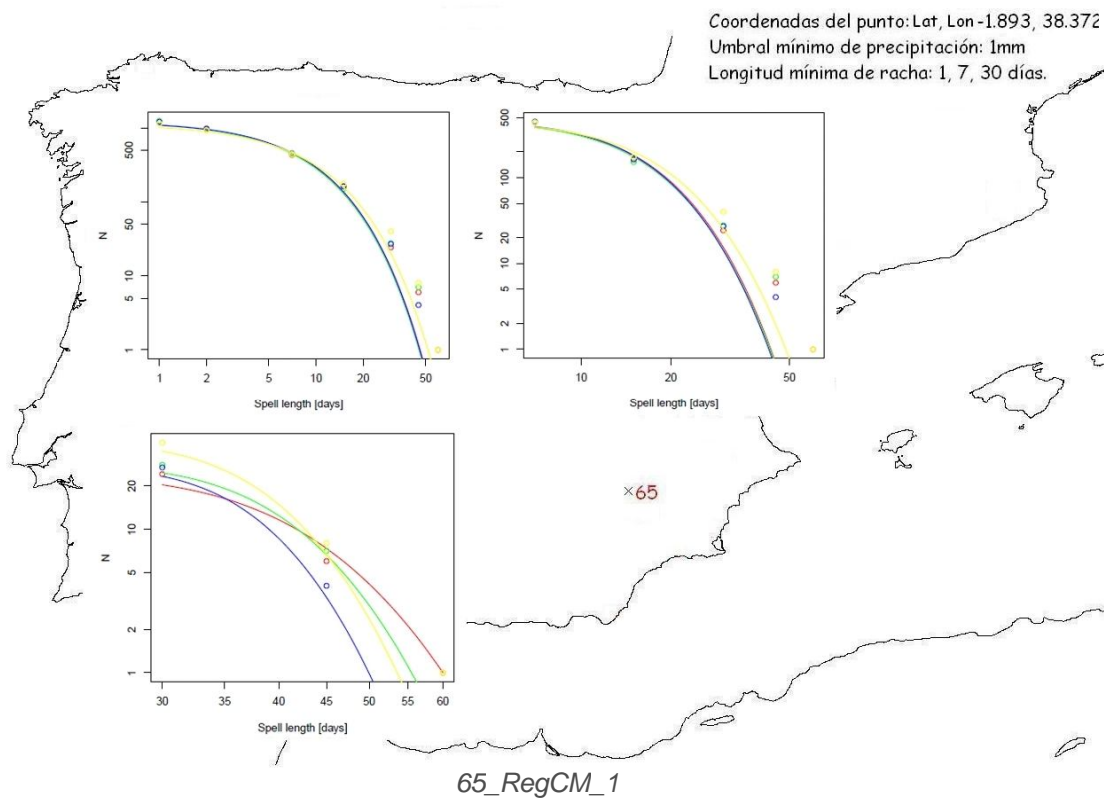
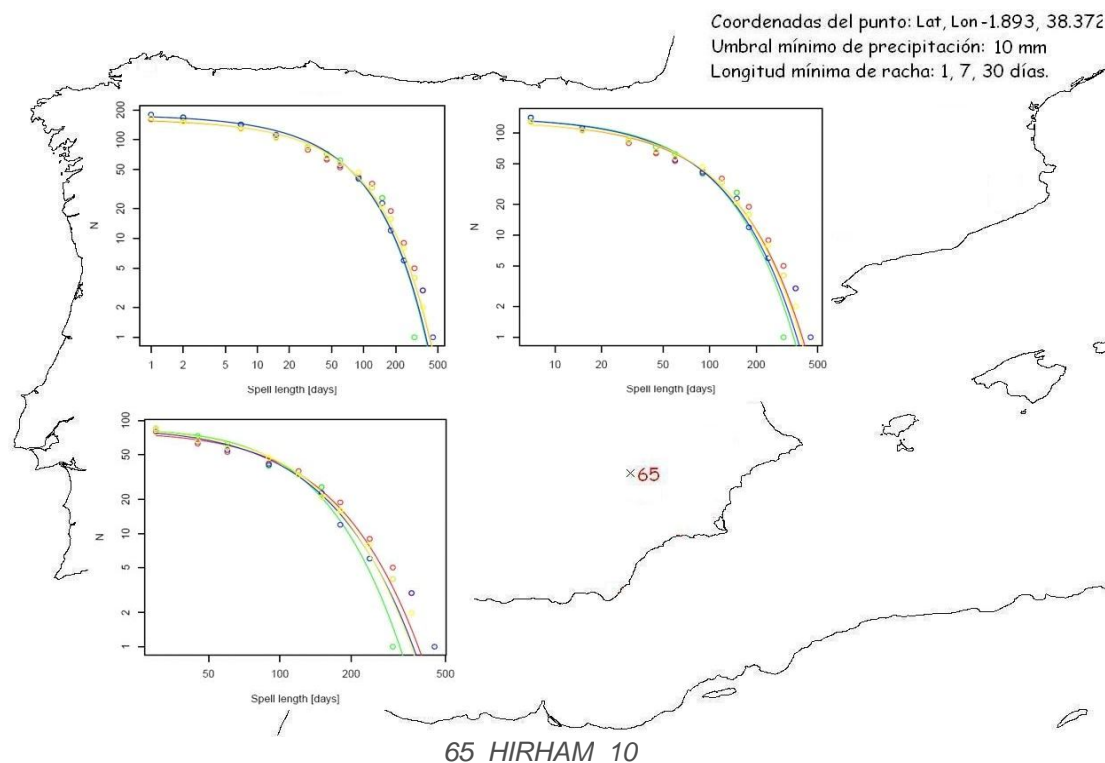
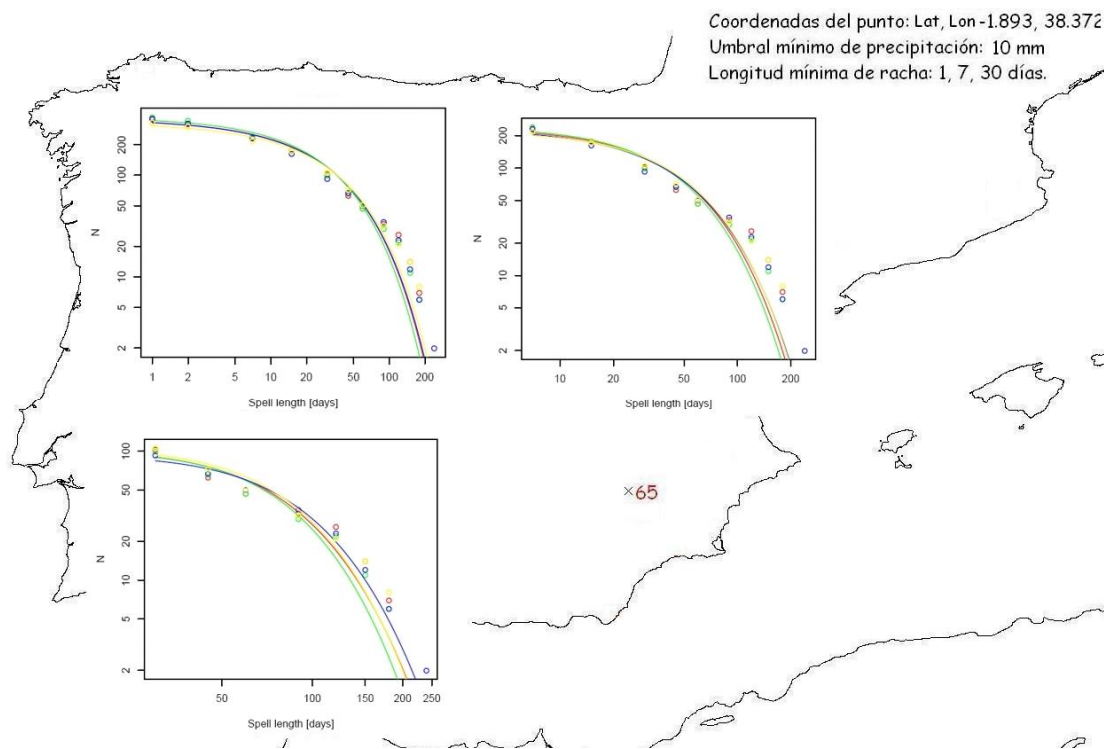


Fig. 4.38. 65\_1

Como se puede observar en la *Figura 4.38*, previa para este punto, las longitudes máximas de rachas secas más largas vuelven a corresponder al modelo HIRAM, seguido del RCA y por último, las más cortas corresponden al RegCM. En cuanto a la tendencia prevista en la frecuencia y magnitud de las rachas secas, parece no existir demasiadas variaciones para los cuatro períodos, aunque si se observa una clara tendencia a ir aumentando esa frecuencia y magnitud con el paso del tiempo.

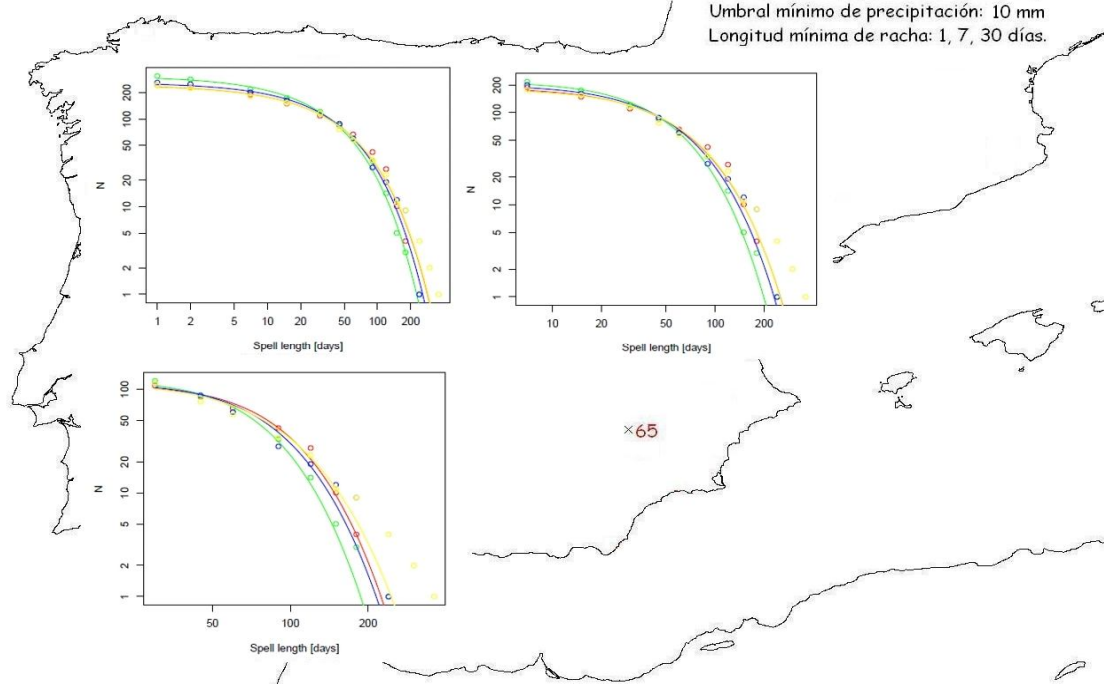






65\_RCA\_10

Coordenadas del punto: Lat, Lon -1.893, 38.372  
Umbral mínimo de precipitación: 10 mm  
Longitud mínima de racha: 1, 7, 30 días.



65\_RegCM\_10

Fig. 4.39. 65\_10

Se puede observar, como conforme se avanza hacia el sur y sureste, las longitudes máximas de las rachas secas aumentan considerablemente. En la *Figura 4.39* se observa que la frecuencia y magnitud de las racha secas para este punto, parece no experimentar demasiadas variaciones para los distintos períodos, aunque sí es cierto que se aprecia una disminución de la frecuencia y magnitud de las rachas para el período 1991-2020, seguida de un considerable aumento para los períodos posteriores a este.



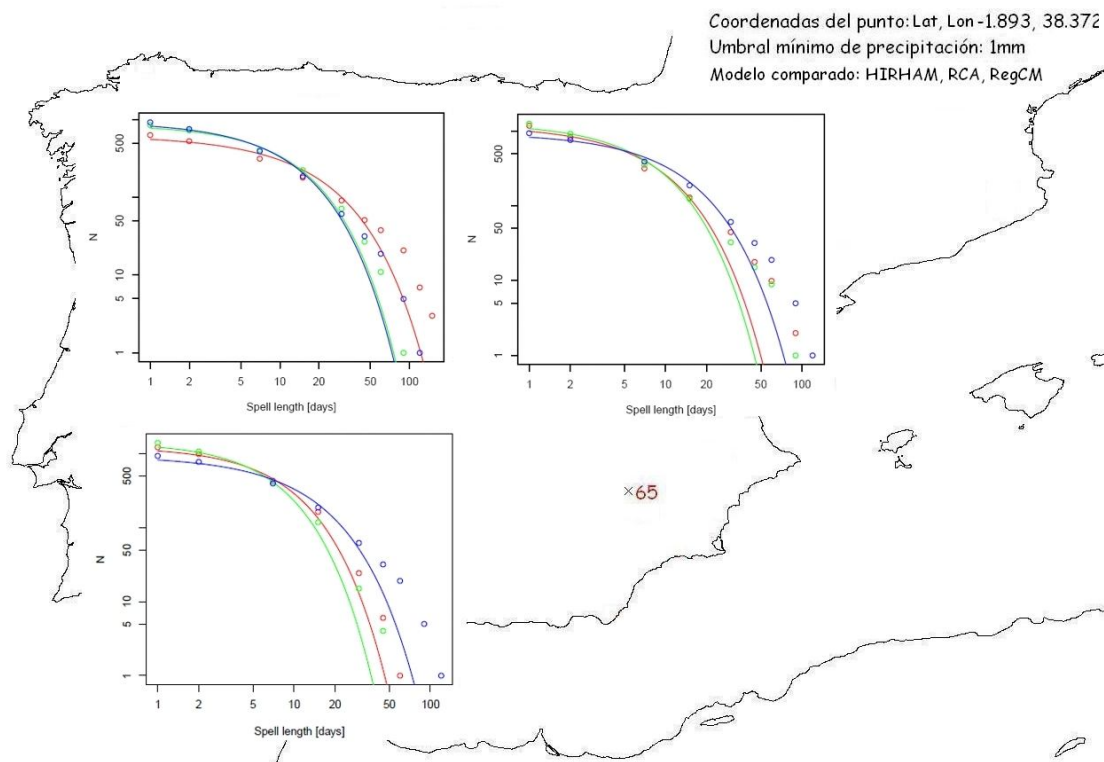


Fig. 4.40. 65\_REALES\_Vs\_MODELOS\_1

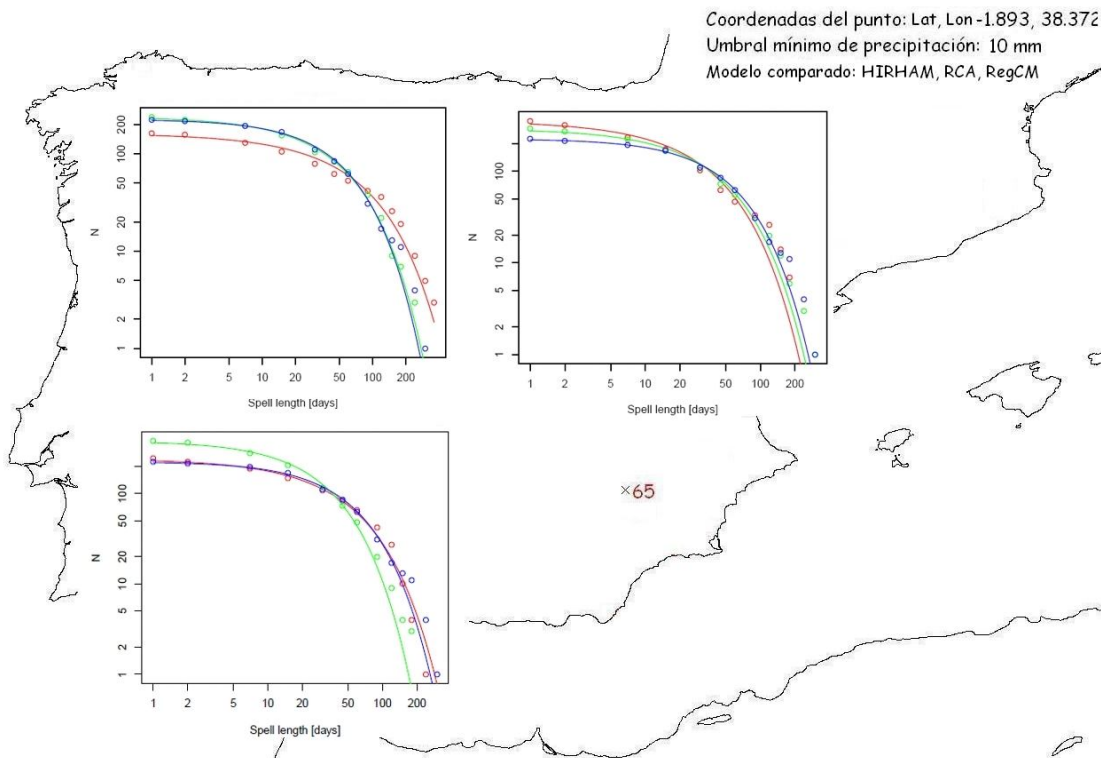
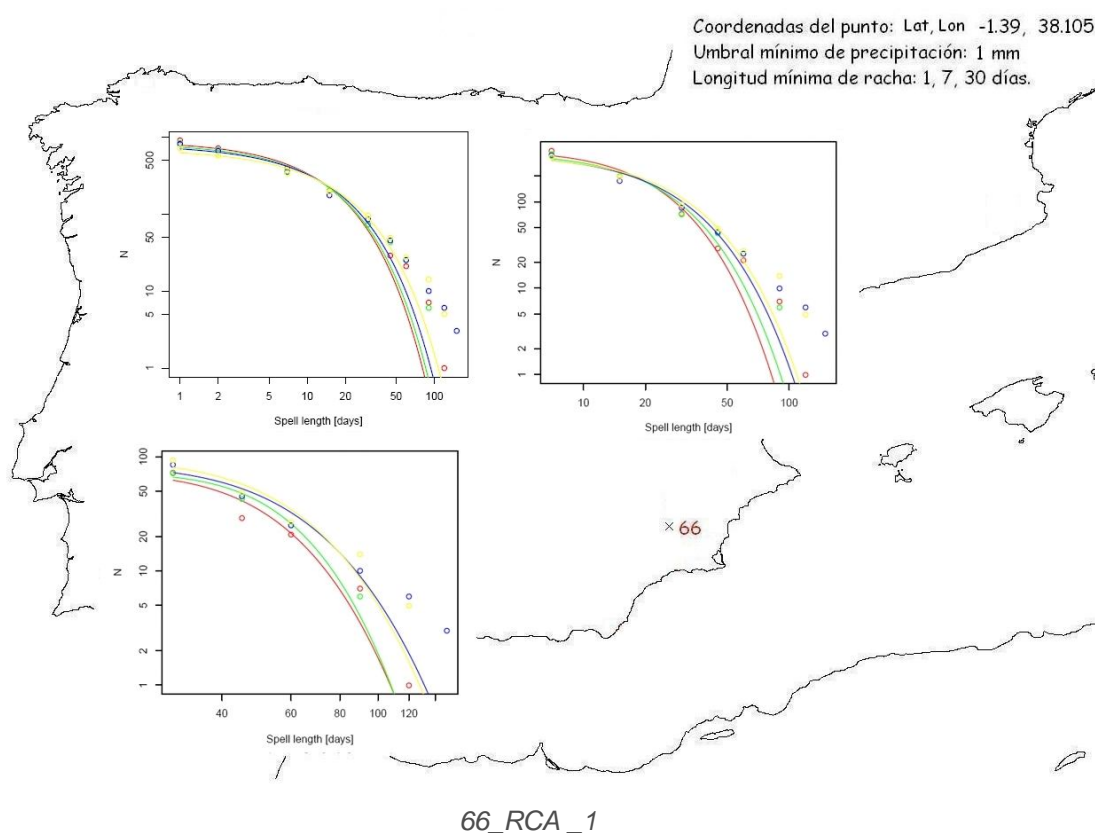
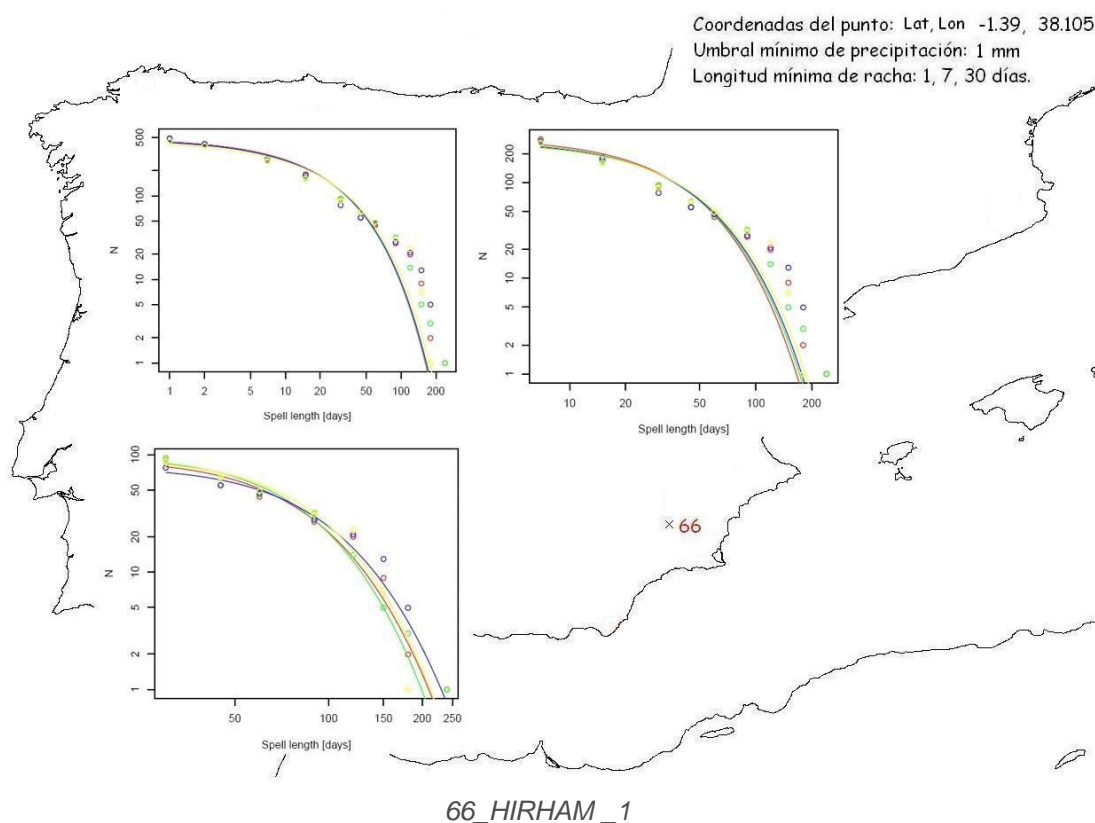


Fig. 4.41. 65\_REALES\_Vs\_MODELOS\_10

Como puede apreciarse en las Fig. 4.40 y 4.41, por la cercanía de las curvas, los datos que mejor representan la realidad son los pertenecientes a la línea de investigación RT3 del modelo HIRHAM para un umbral de precipitación mínimo de 1mm y los mismos datos además de los pertenecientes a la línea de investigación RT2B del modelo RegCM para un umbral de precipitación mínimo de 10mm.

Para el **PUNTO 66** los gráficos obtenidos del análisis de los tres modelos para los distintos periodos se muestran en las *Figuras 4.42 y 4.43*.



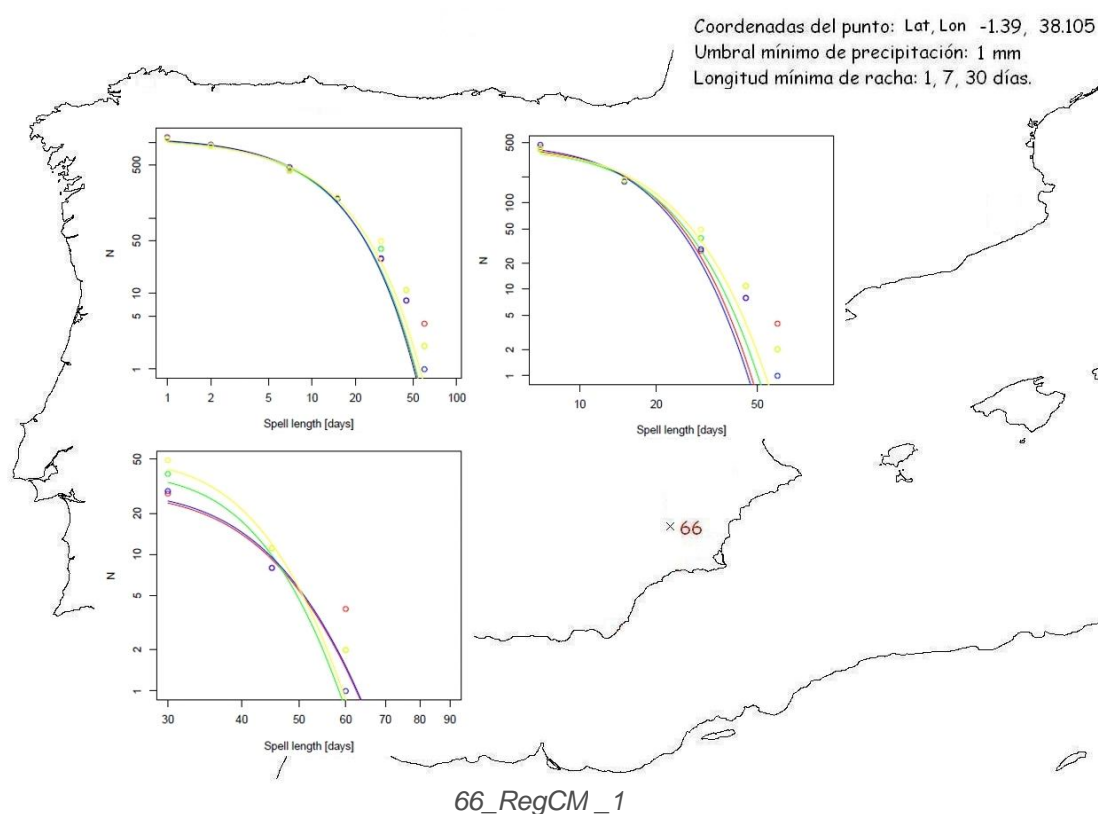
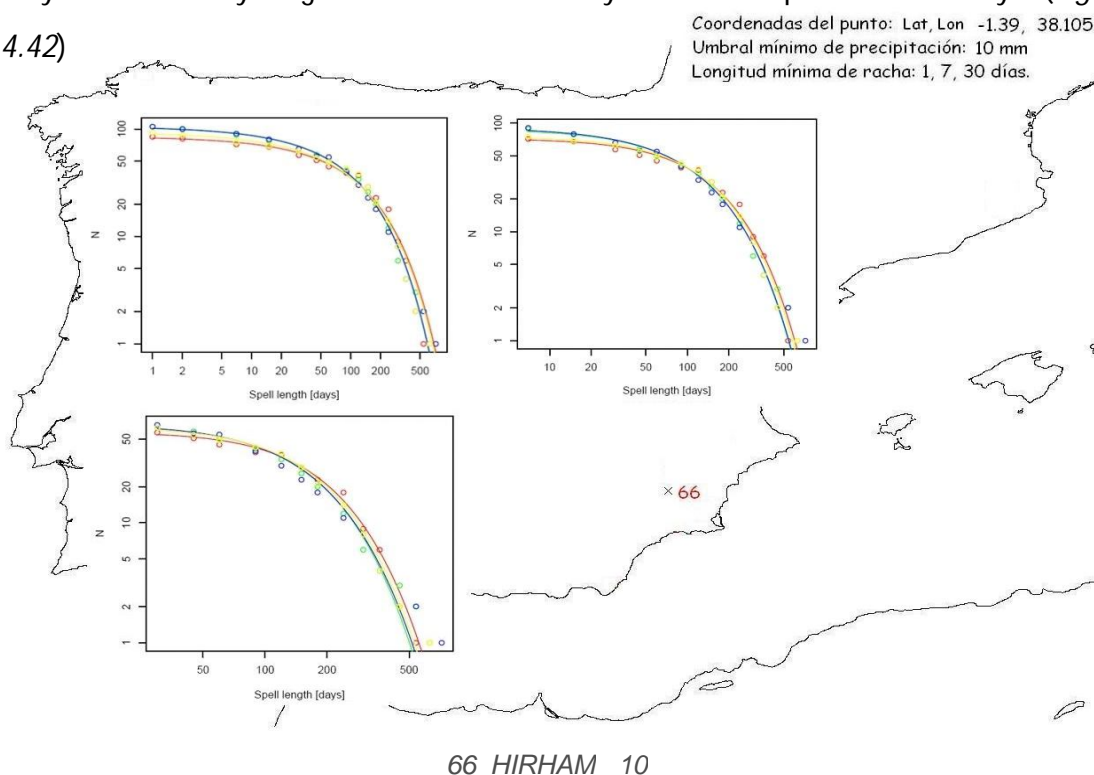


Fig. 4.42. 66\_1

Al igual que para el punto 65 las longitudes máximas de rachas secas más largas vuelven a corresponder al modelo HIRAM. En cuanto a la tendencia prevista en la frecuencia y magnitud de las rachas secas, parece no existir demasiadas variaciones para los cuatro períodos, aunque si se observa una cierta alternancia de períodos con mayor frecuencia y magnitud de rachas secas y otros en la que esta disminuye. (Figura 4.42)



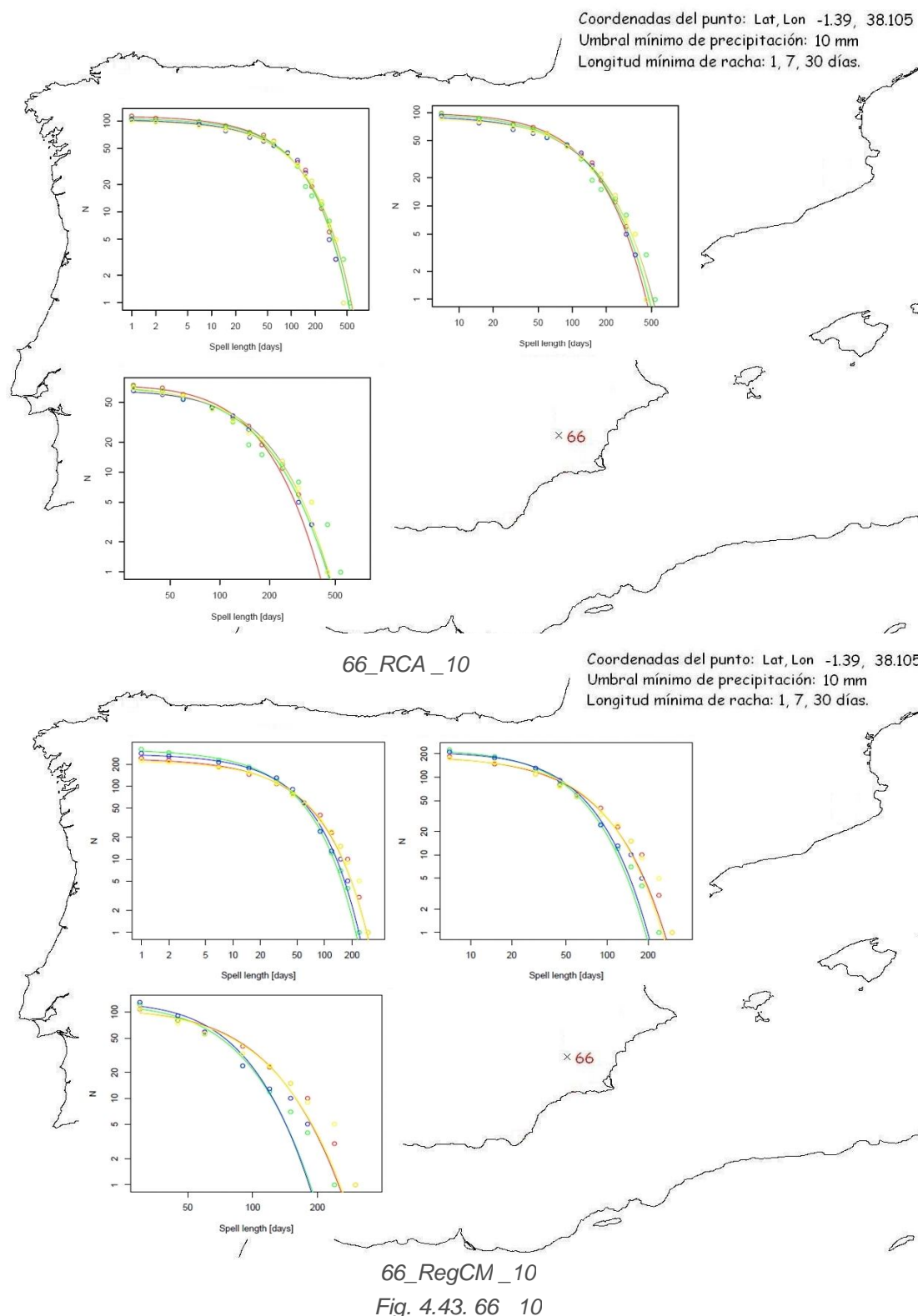


Fig. 4.43. 66\_10

Para el punto 66, con un umbral de precipitación mínimo de 10mm se puede apreciar en la Fig. 4.43, las longitudes máximas de racha coinciden para el modelo HIRAM y RCA (en 500 días aprox.) y son algo inferiores para el modelo RegCM (250 días aprox.). En cuanto a magnitud y frecuencia de las rachas, se observa que existen pocas variaciones para los distintos períodos para los modelo HIRHAM y RCA, a diferencia del modelo RegCM, en el que se aprecia como los períodos 1961-1990 y 2051-2080, son algo más severos en intensidad y frecuencia de rachas secas que los otros dos períodos.

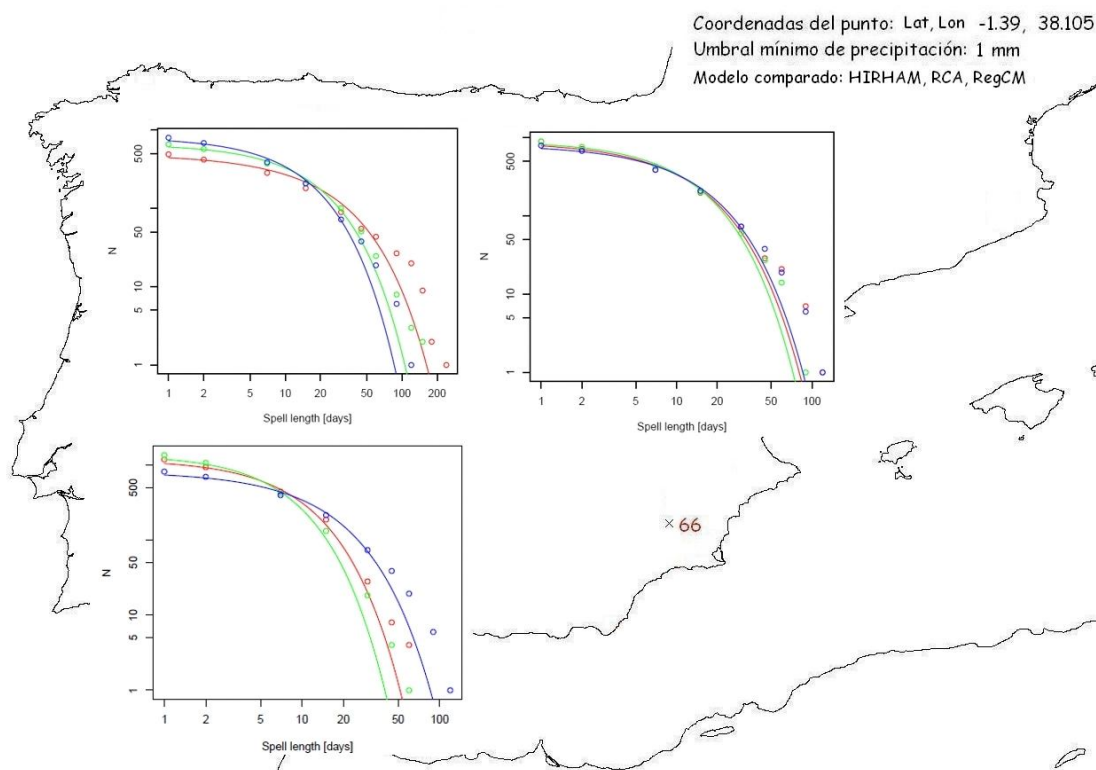


Fig. 4.44. 66\_REALES\_Vs\_MODELOS\_1

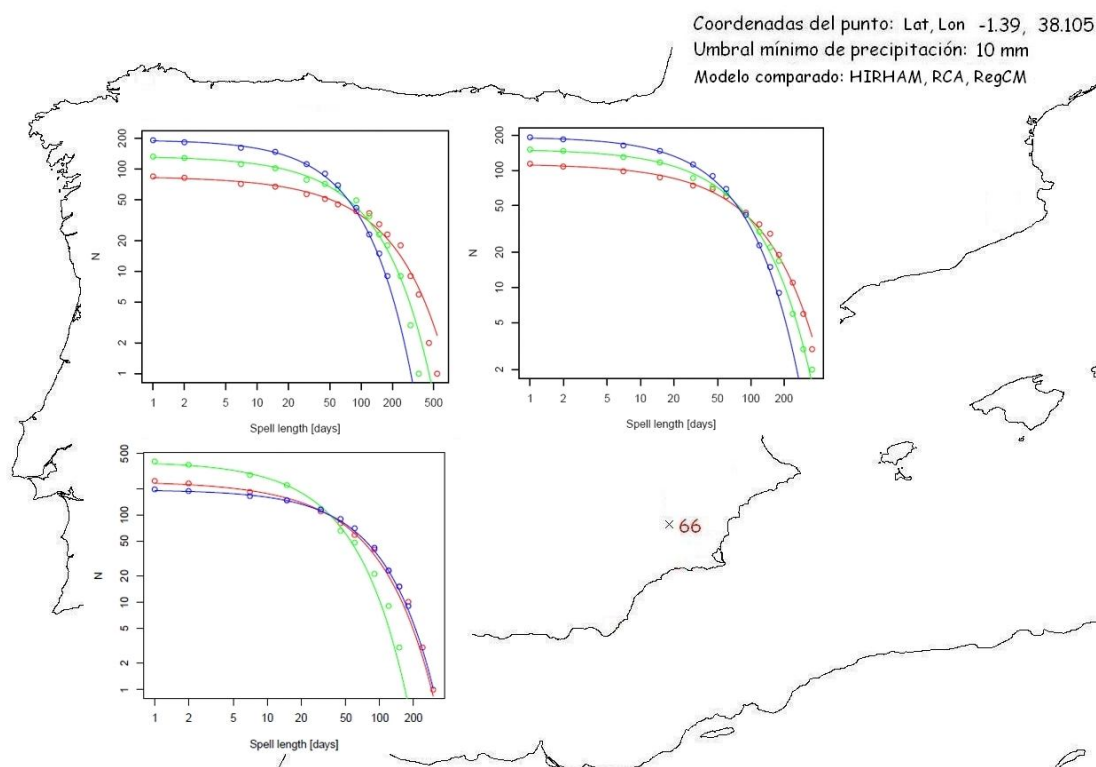
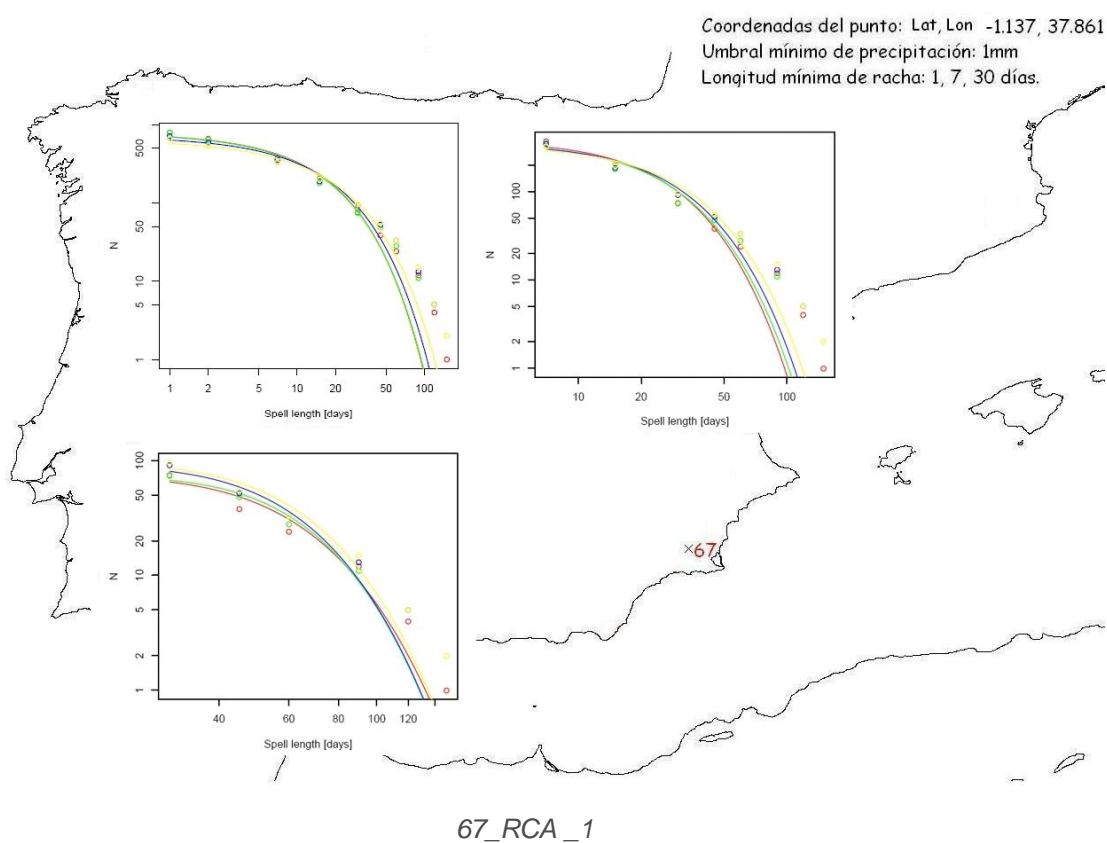
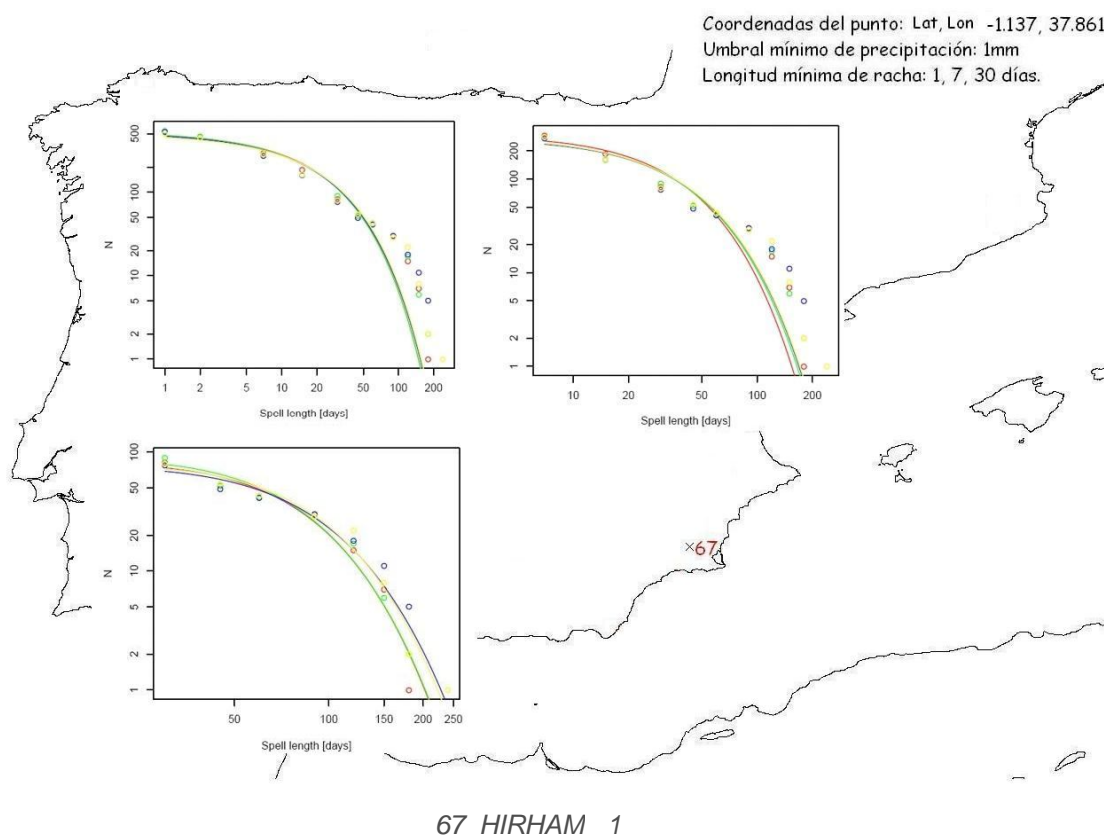


Fig. 4.45. 66\_REALES\_Vs\_MODELOS\_10

Para el punto 66, parece ser que los datos que mejor se ajustan a la realidad son los obtenidos del modelo RCA para un umbral mínimo de precipitación de 1 mm (Figura 4.44) y los datos de la línea de investigación RT2B del modelo RegCM para un umbral de precipitación mínimo de 10 mm. (Figura 4.45)

Los gráficos obtenidos del análisis de los tres modelos para el **PUNTO 67** se muestran en las Figuras 4.46 y 4.47.





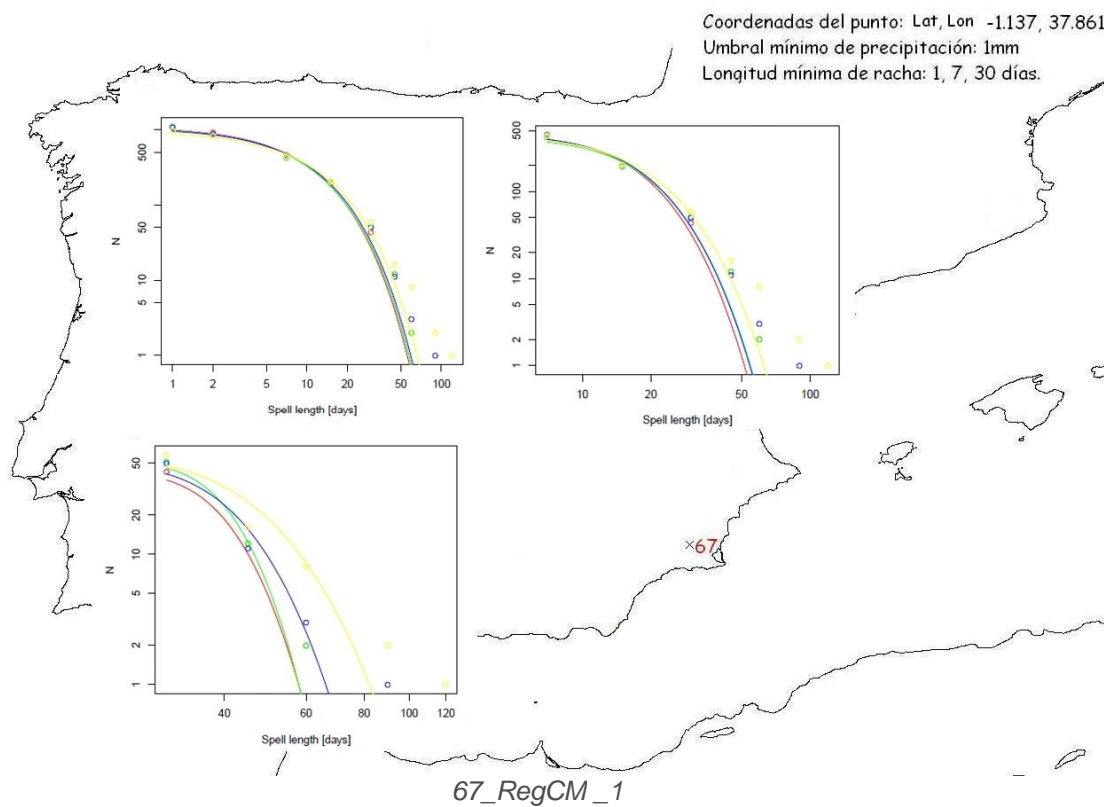
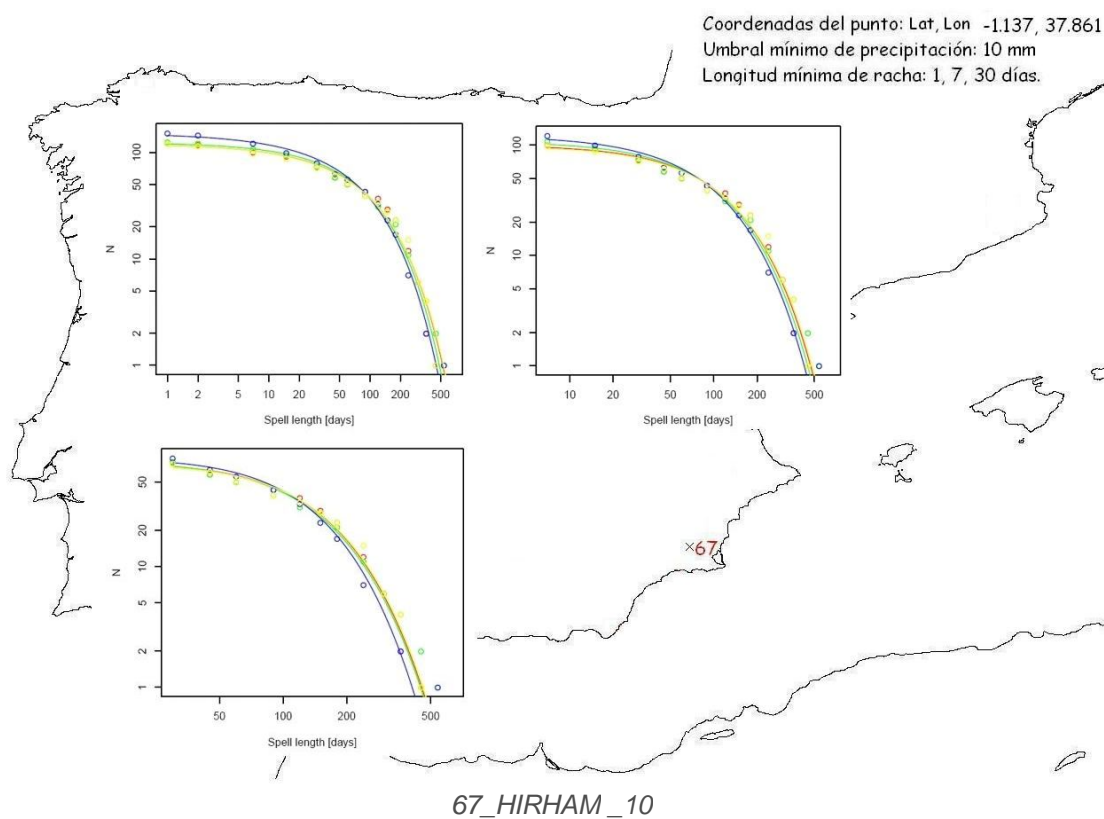


Fig. 4.46. 67 \_1

Para este punto las longitudes de racha más largas vuelven a corresponder al modelo HIRHAM. Observando la frecuencia y magnitud de las rachas secas, se observa que la tendencia en líneas generales para los tres modelos muestra un leve incremento de la frecuencia y magnitud de las rachas secas a medida que se avanza en el tiempo. (Figura 4.46)



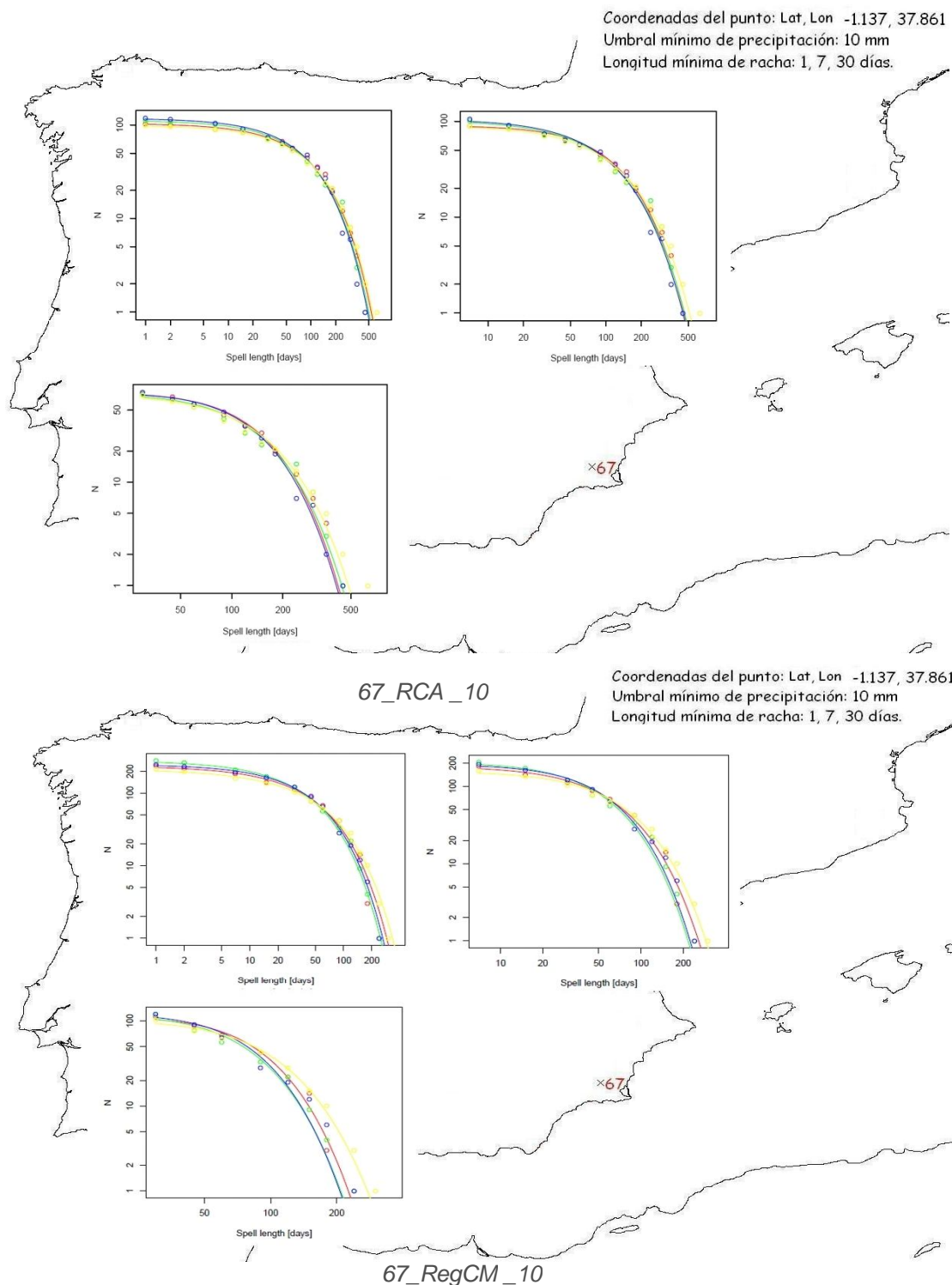


Fig. 4.47. 67\_10

En la *Figura 4.47* se observa que para el umbral de precipitación mínimo de 10mm, los modelos HIRHAM y RCA muestran longitudes máximas de rachas secas mayores que el modelo RegCM (500 días aprox. para HIRAM y RCA y 250 días aprox. para RegCM). En cuanto a frecuencia y magnitud se refiere, los tres modelos muestran pocas variaciones de un período a otro, aunque en el modelo RegCM esa variación es un poco más acusada, indicando una disminución en la frecuencia y magnitud de las rachas secas para los períodos 1991-2020 y 2021-2050, y un posterior aumento de esta en el período 2051-2080.

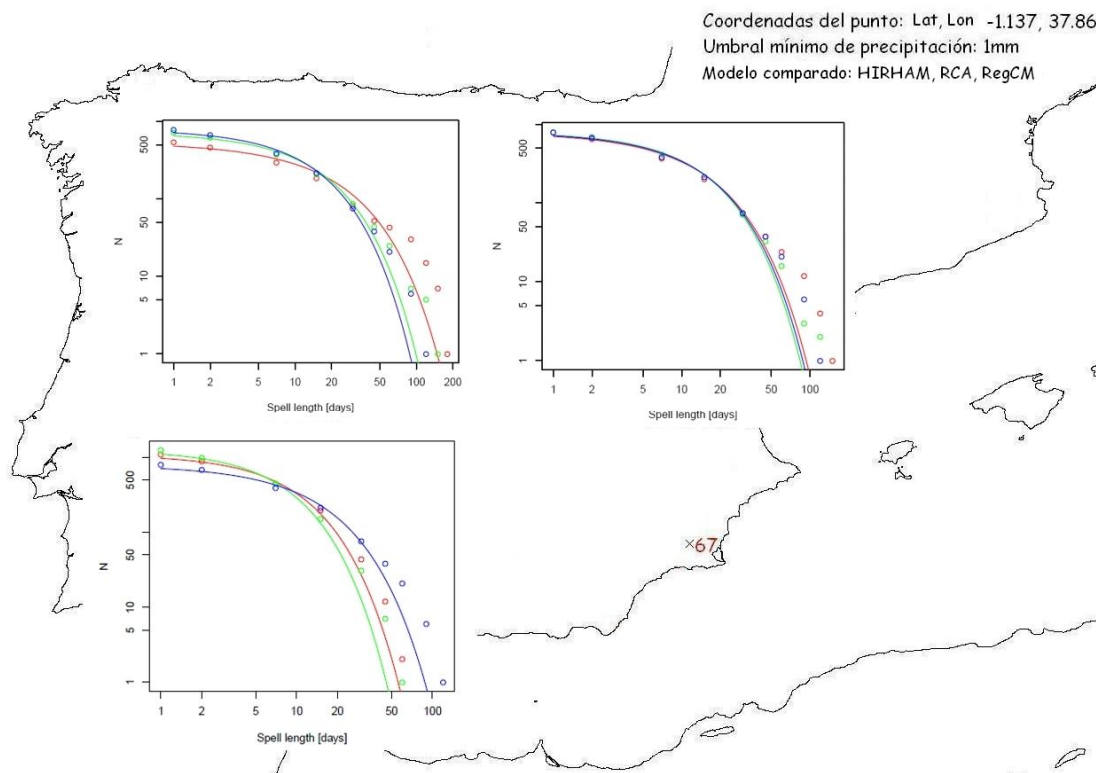


Fig. 4.48. 67\_REALES\_Vs\_MODELOS\_10

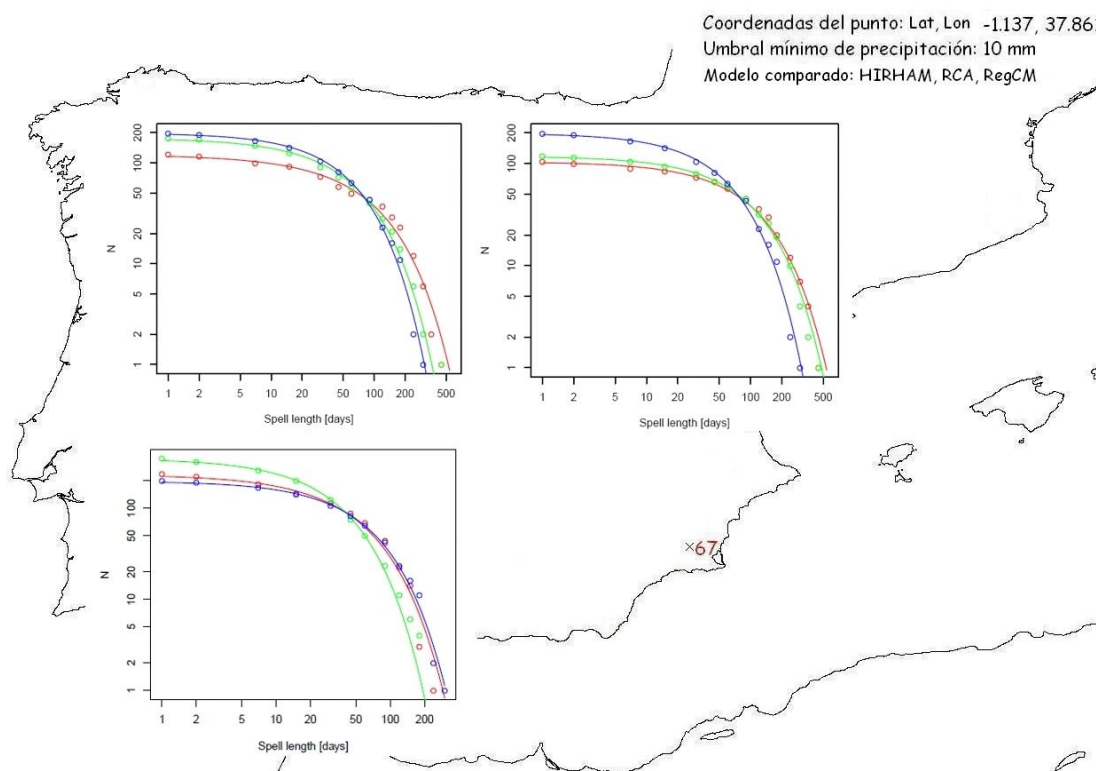
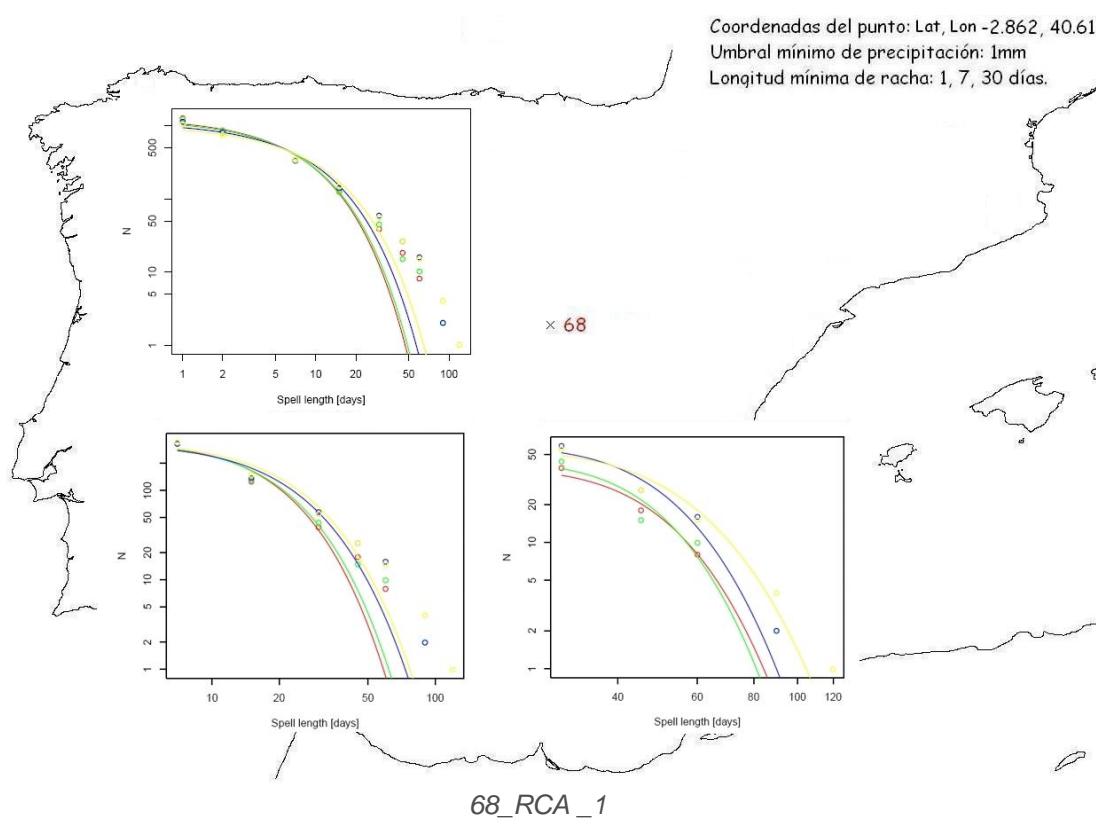
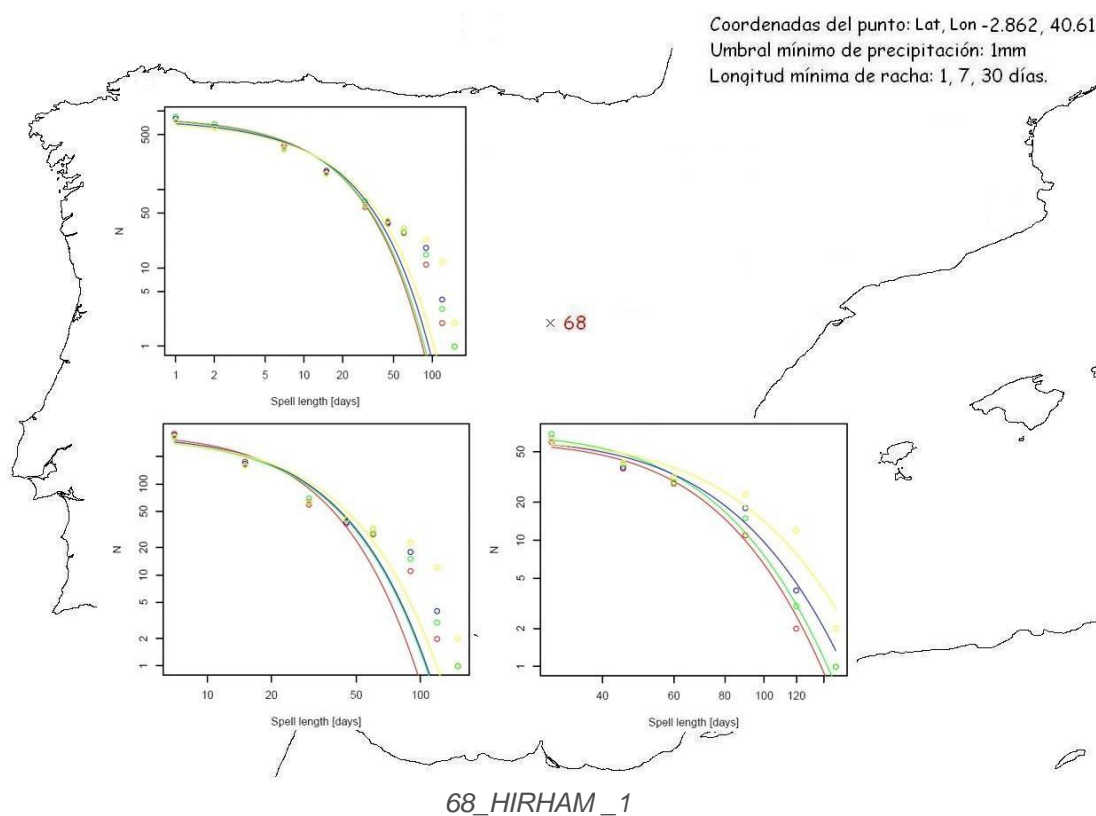


Fig. 4.49. 67\_REALES\_Vs\_MODELOS\_10

Para el punto 67, parece ser que los datos que mejor se ajustan a la realidad son los obtenidos del modelo RCA y los procedentes de la línea de investigación RT3 del modelo HIRHAM para un umbral mínimo de precipitación de 1 mm (Figura 4.48), y los datos de la línea de investigación RT2B del modelo RegCM, así como los RT3 del modelo HIRHAM para un umbral de precipitación mínimo de 10 mm (Figura 4.49).

Para el **PUNTO 68**, los gráficos obtenidos para los tres modelos se muestran en las Figuras 4.50 y 4.51.



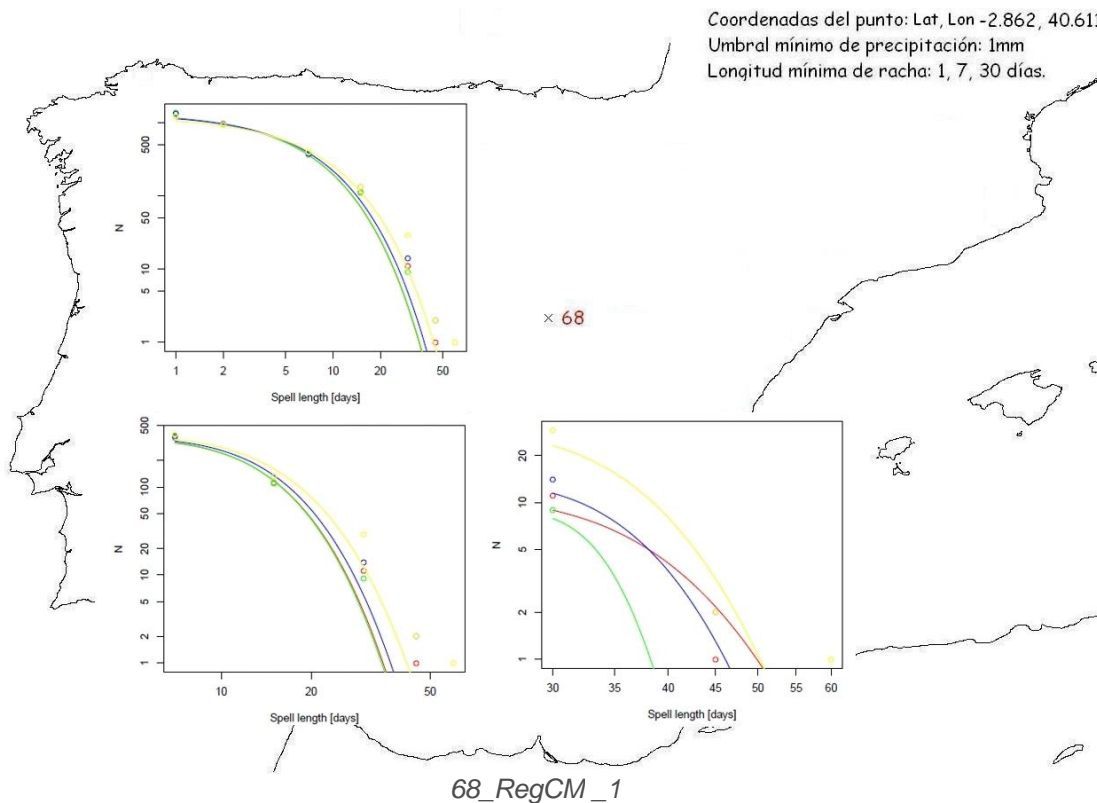
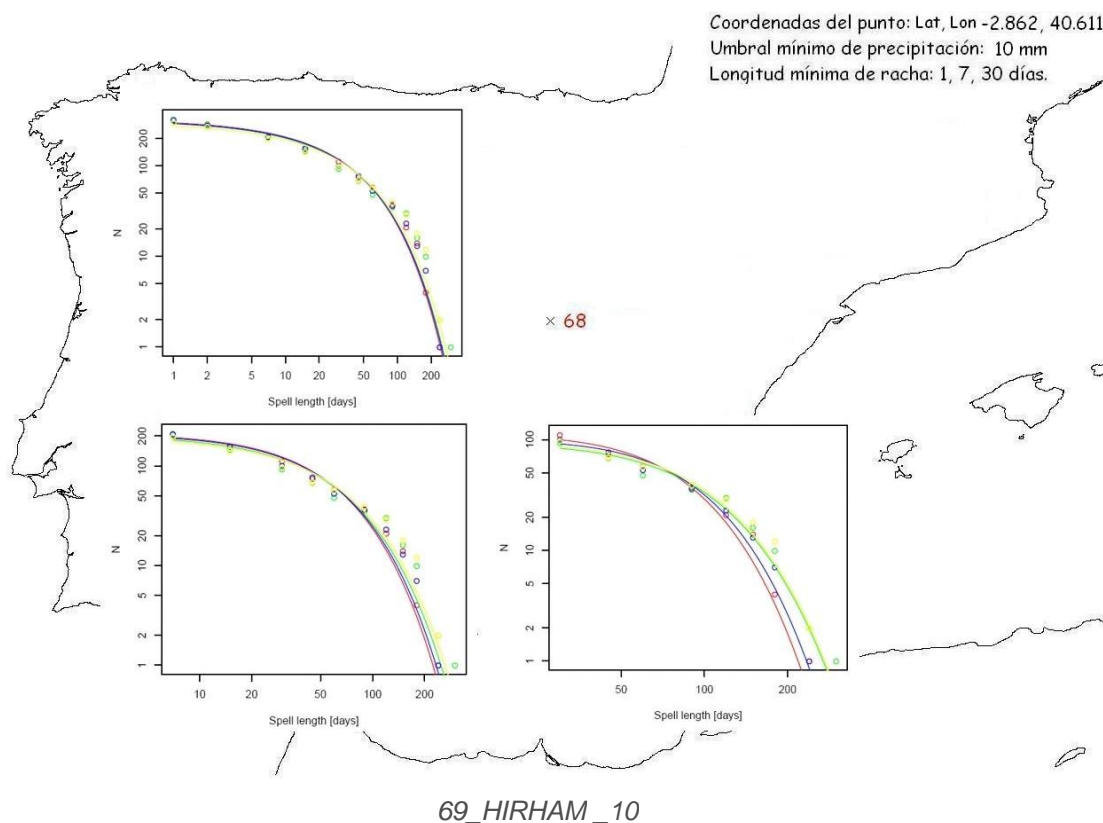


Fig. 4.50. 68\_1

Como se observa en la *Figura 4.50*, de nuevo para este punto el modelo HIRHAM y RCA predicen longitudes máximas de rachas secas más largas que el modelo RegCM (100 días aprox. para HIRHAM y RCA, 50 días aprox. para RegCM). Para este punto los tres modelos coinciden en la tendencia a aumentar la frecuencia y magnitud de rachas secas a medida que avanza el tiempo.



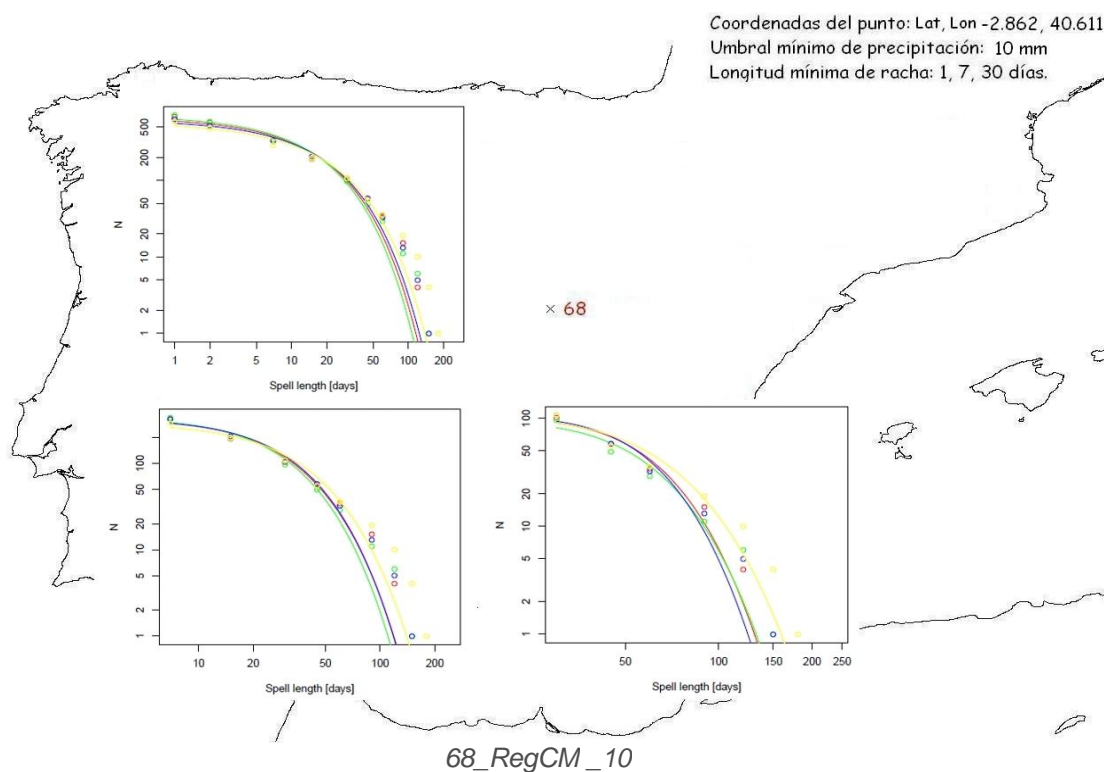
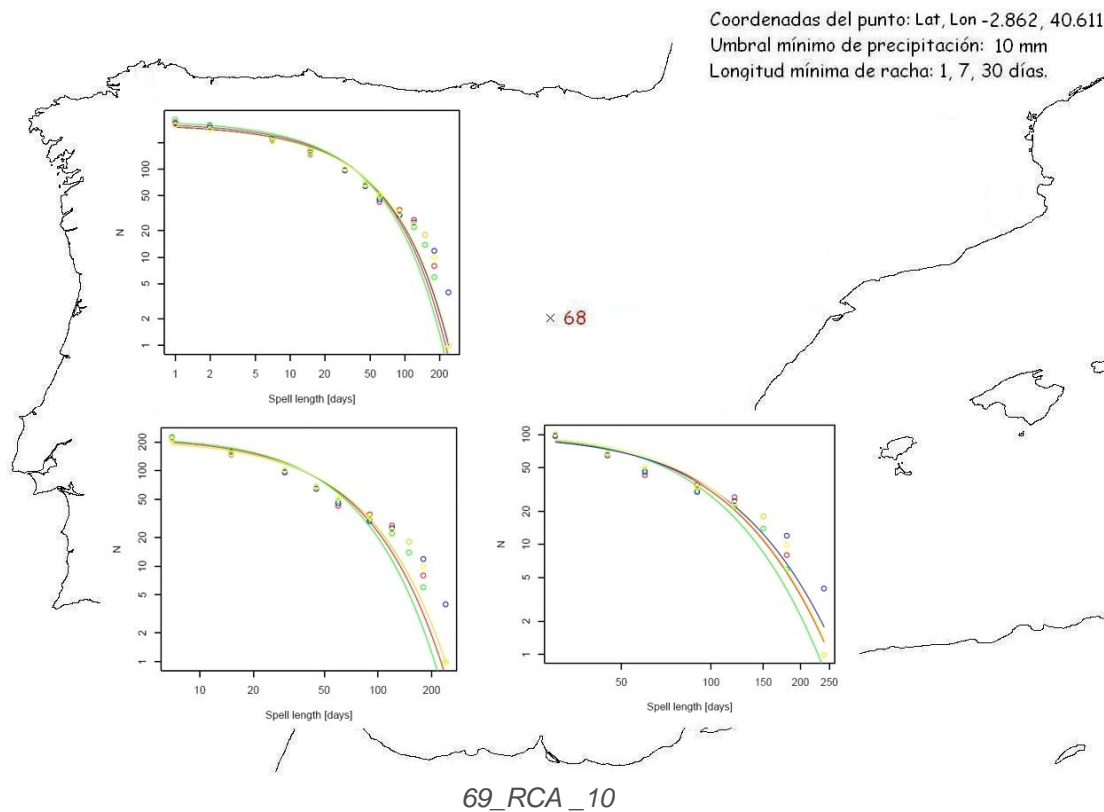


Fig. 4.51. 68\_10

Para el umbral de precipitación mínimo de 10mm los tres modelos coinciden prácticamente en las longitudes máximas de rachas secas y en la tendencia de la frecuencia y magnitud de las rachas siendo muy similar para los cuatro periodos con una ligera tendencia a aumentar esa frecuencia y magnitud con el tiempo (Figura 4.51)



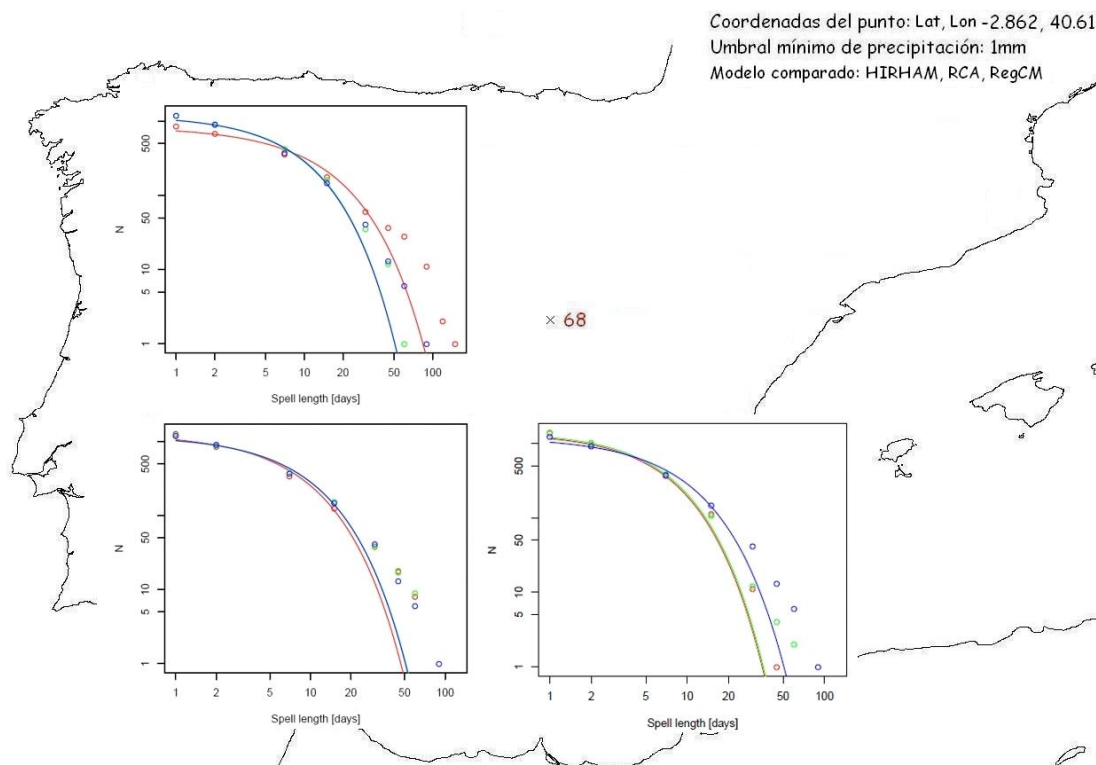


Fig. 4.52. 68\_REALES\_Vs\_MODELOS\_1

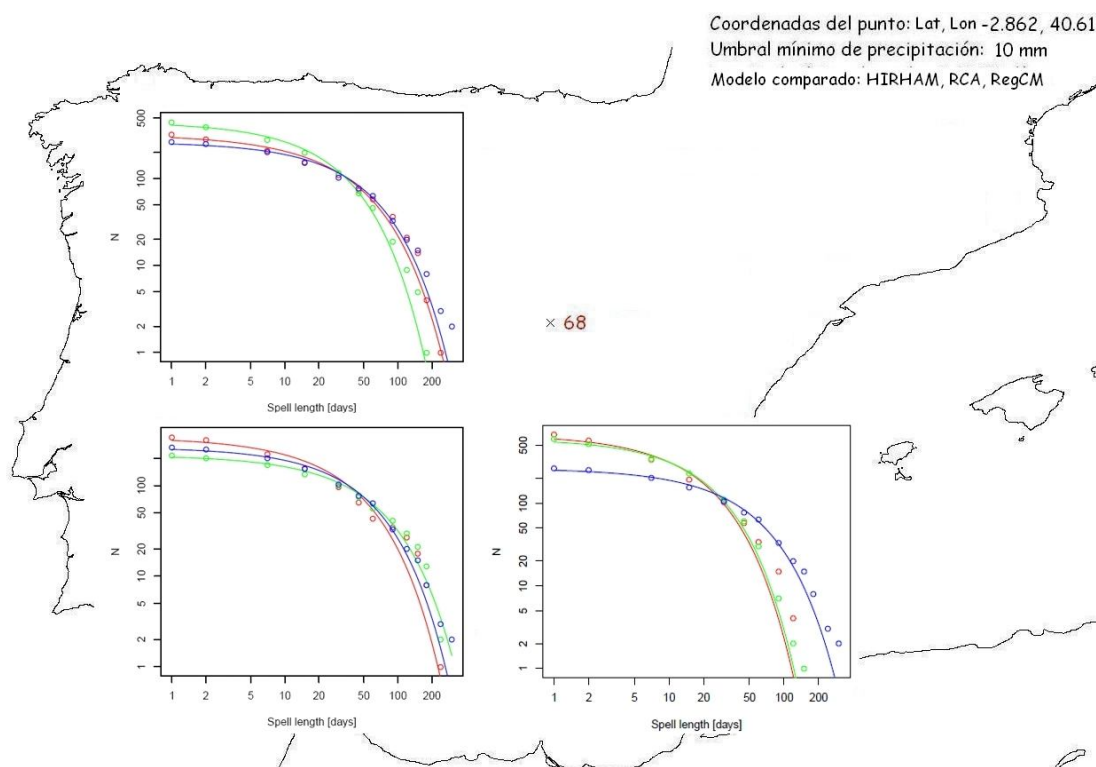
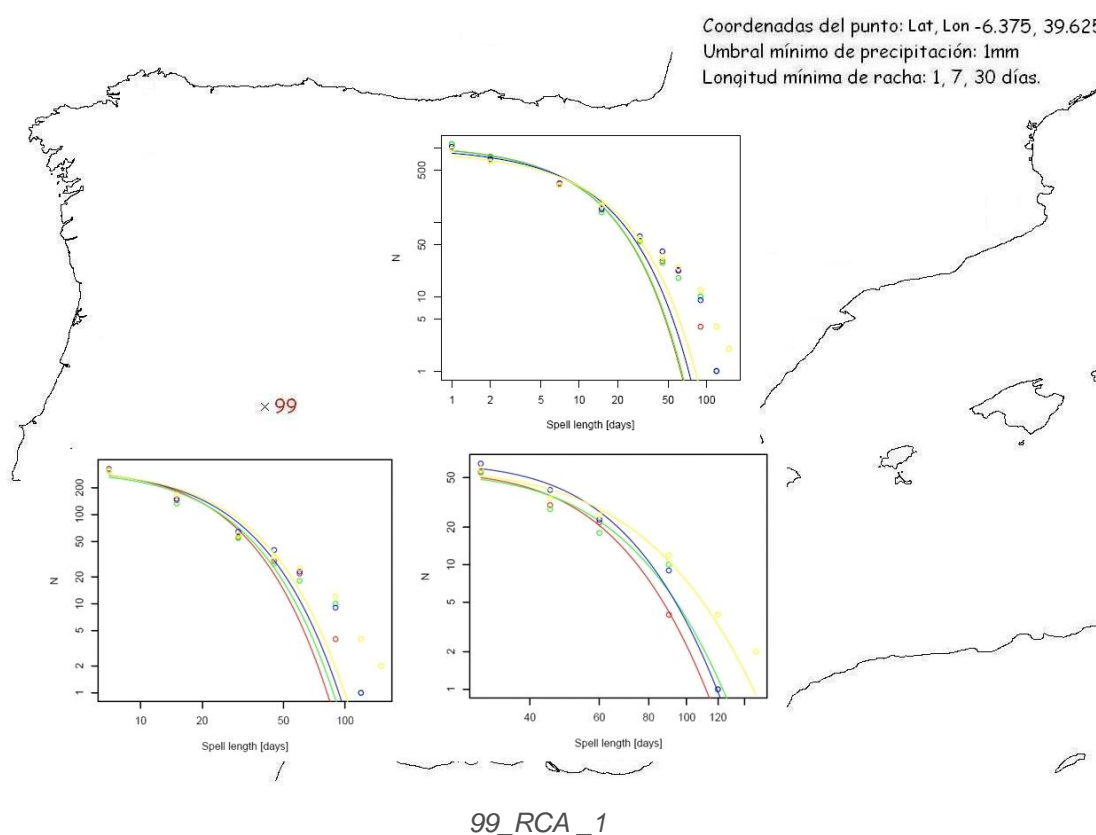
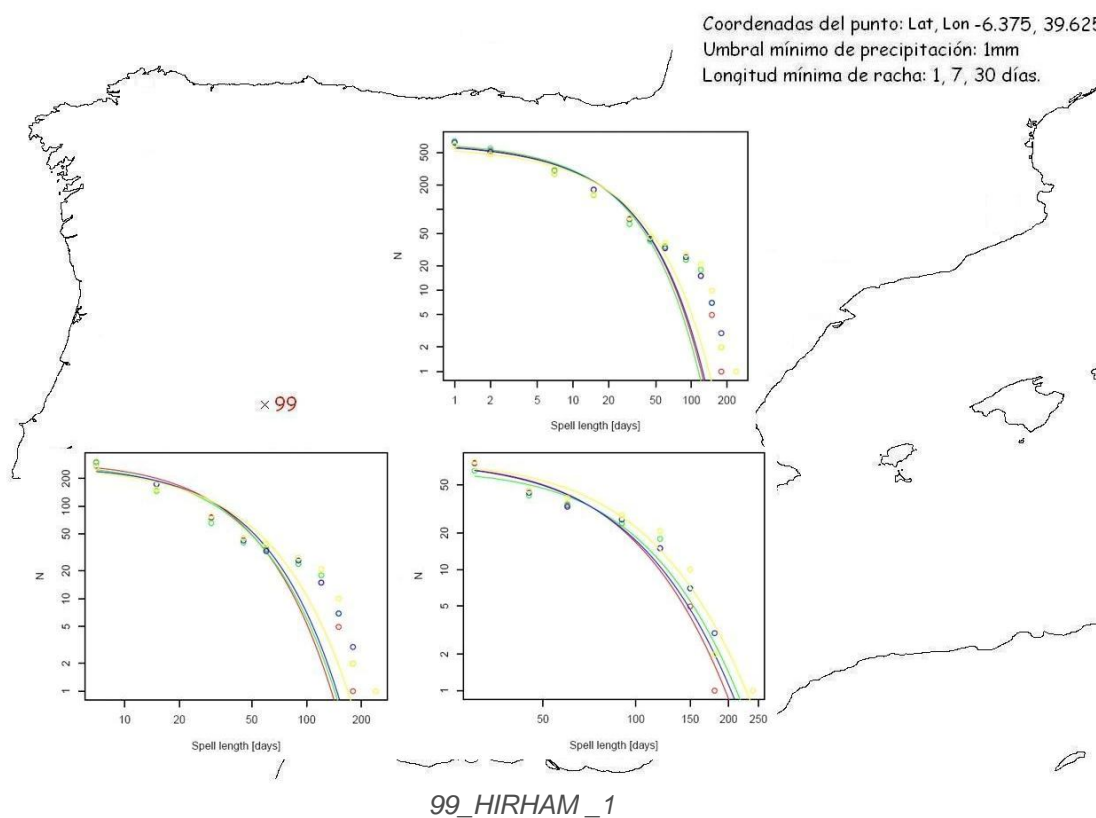
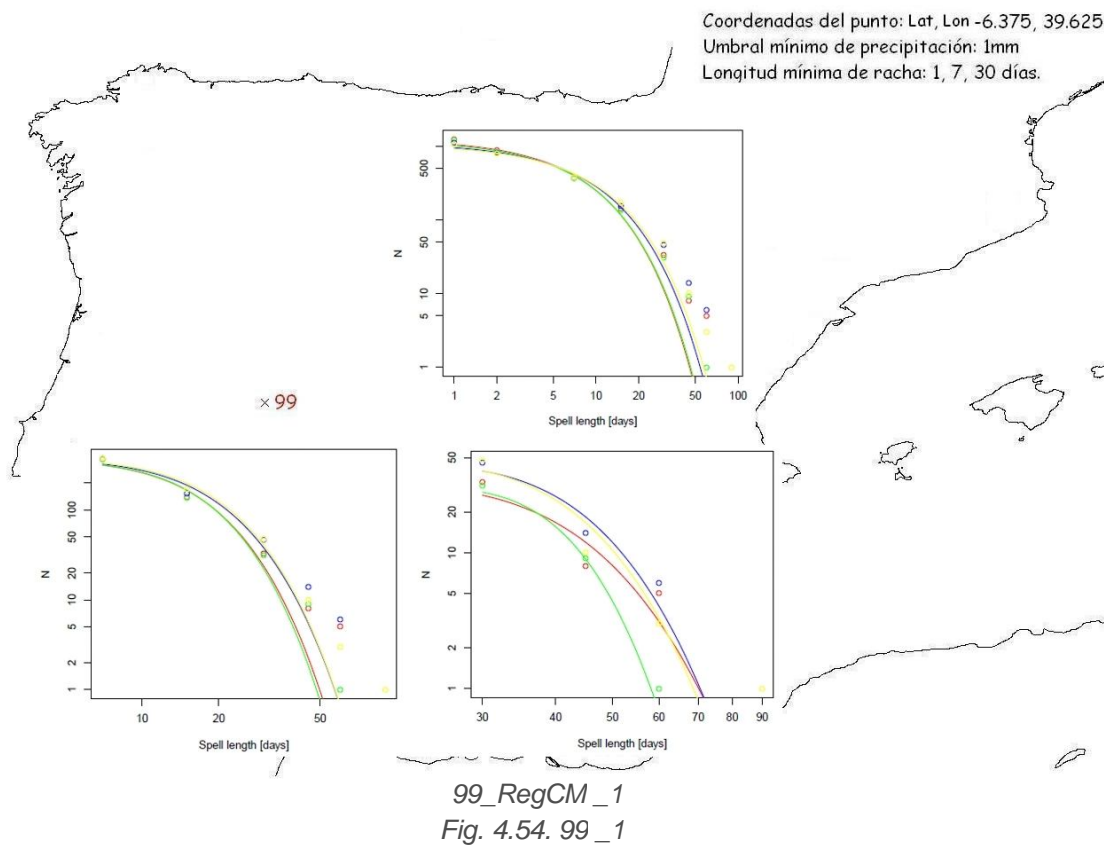


Fig. 4.53. 68\_REALES\_Vs\_MODELOS\_10

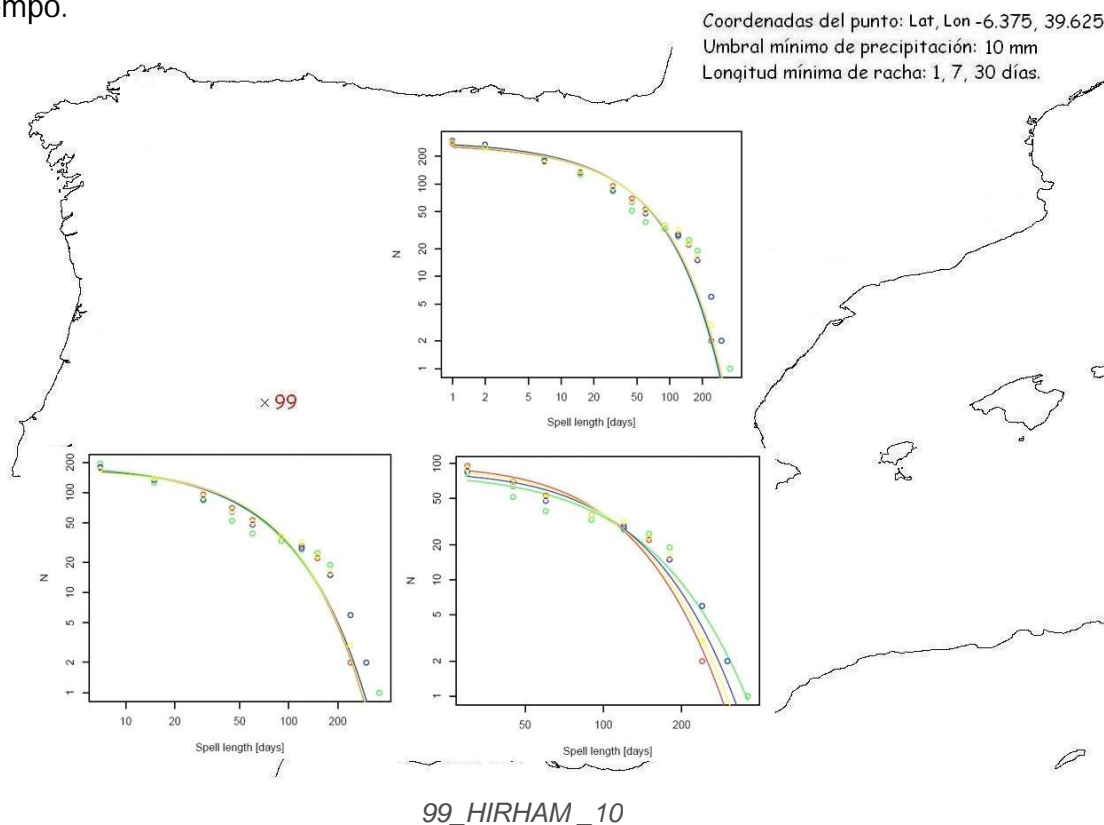
Para el punto 68 los datos que mejor se ajustan a la realidad parecen son los del modelo RCA así como los procedentes de la línea de investigación RT3 del modelo HIRHAM para un umbral mínimo de precipitación de 1mm (Figura 4.52). Para un umbral mínimo de precipitación de 10mm (Figura 4.53) los RT2B del modelo HIRHAM y los datos del modelo RCA son los que mejor se ajustan.

Por último para el **PUNTO 99** los gráficos obtenidos del análisis de los tres modelos se muestran en las Figuras 4.54 y 4.55.





Como se observa en la *Figura 4.54*, para este punto, y para un umbral mínimo de precipitación de 1 mm, el modelo HIRHAM vuelve a ser el que predice rachas secas de mayor duración. En lo referente a la frecuencia y magnitud de las rachas, cabe destacar que los tres modelos coinciden en un aumento de esta según se avanza en el tiempo.



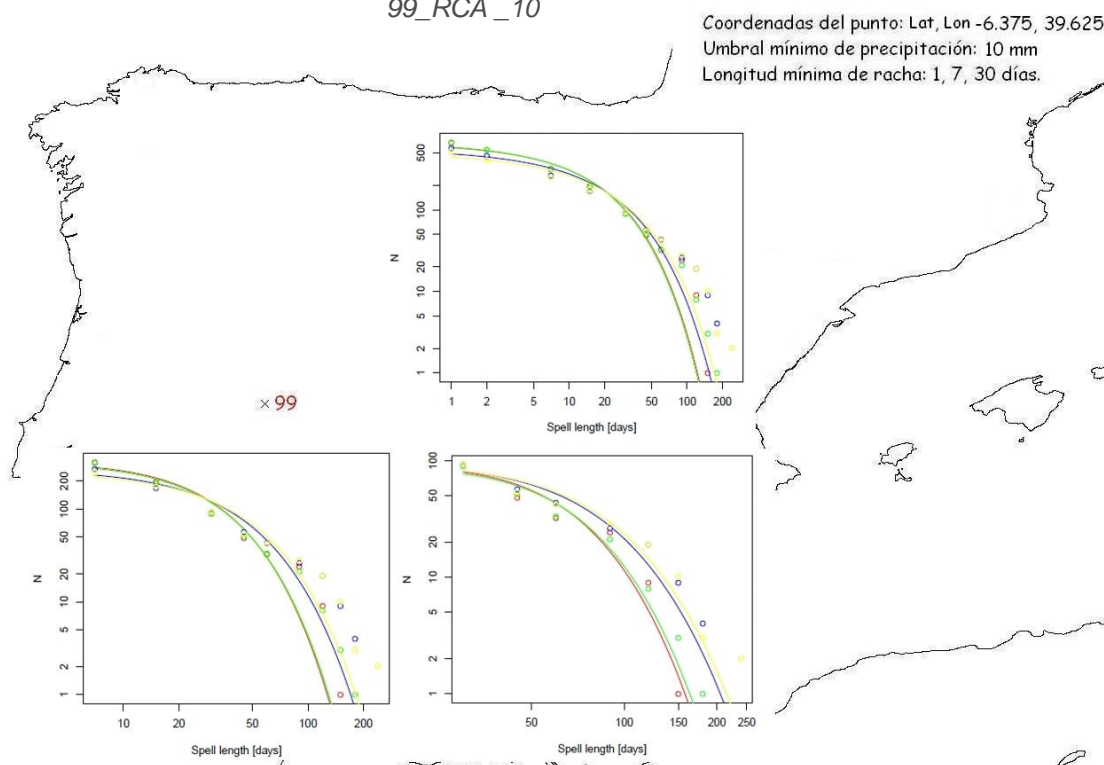
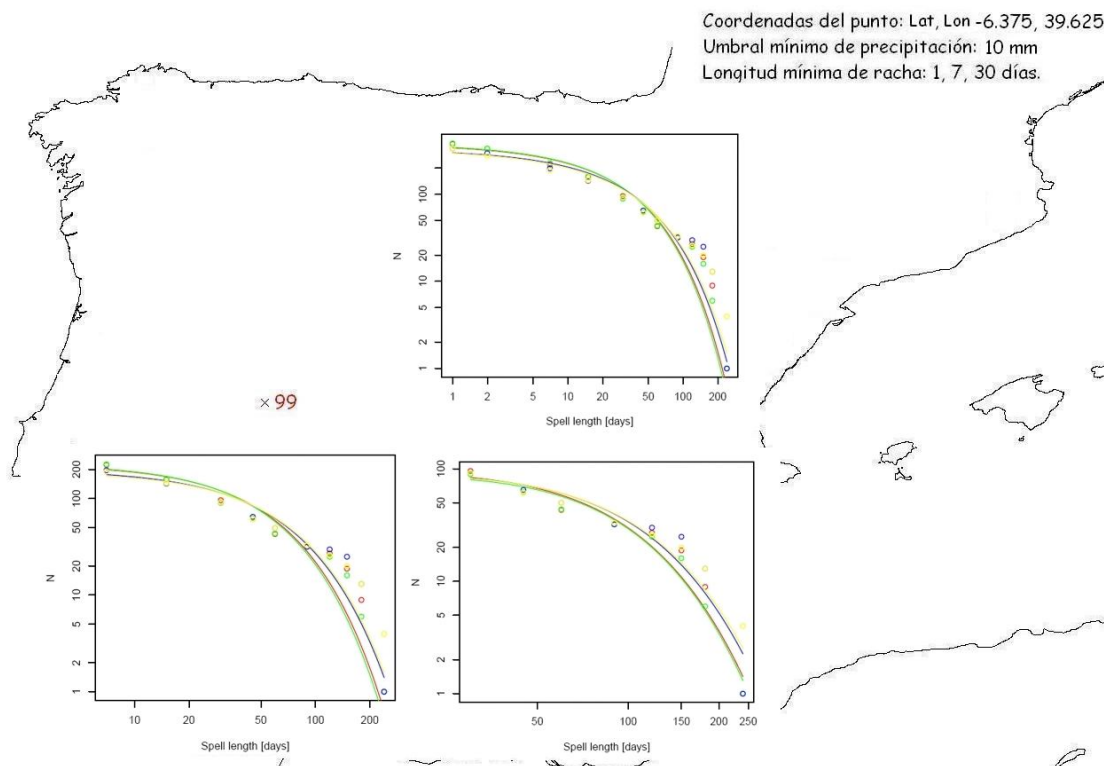


Fig. 4.55. 99\_10

Para un umbral mínimo de precipitación de 10 mm (*Figura 4.55*), los tres modelos coinciden en la longitud máxima de las rachas secas (200 días aprox.). En cambio para la frecuencia y magnitud de las rachas secas, el modelo HIRHAM predice muy poca variabilidad entre los distintos períodos, mientras que los modelos RCA y RegCM, indican un aumento de la frecuencia y magnitud para períodos futuros.

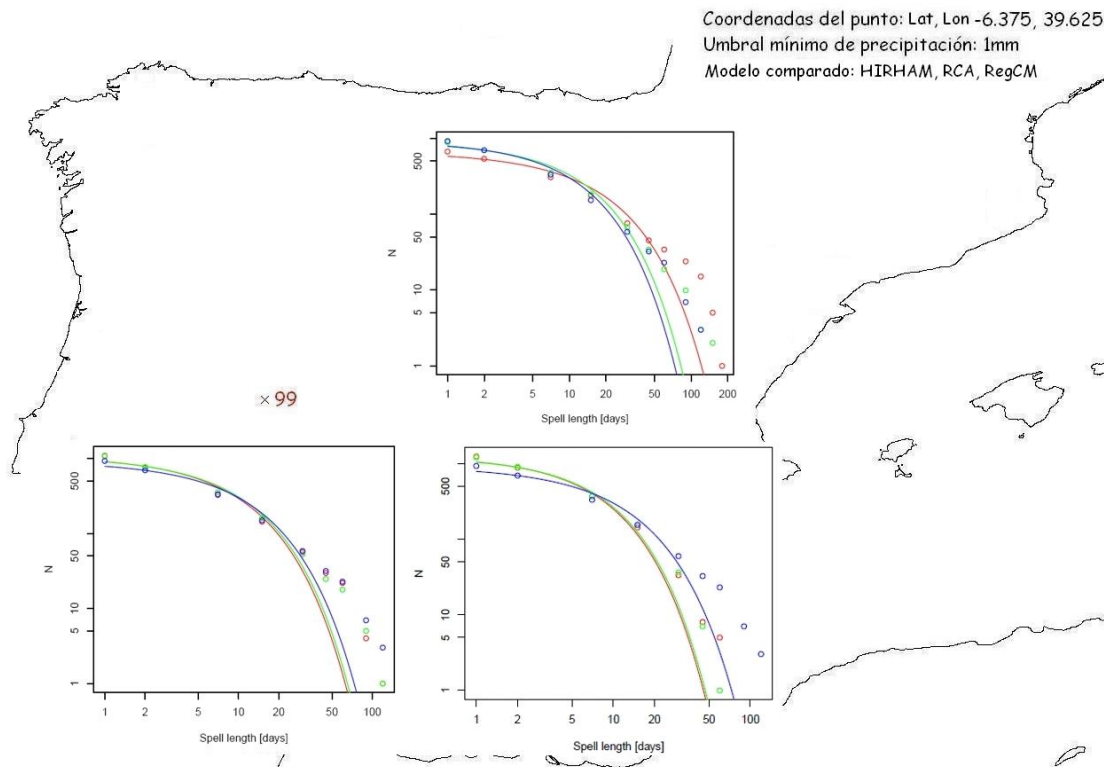


Fig. 4.56. 99\_REALES\_Vs\_MODELOS\_1

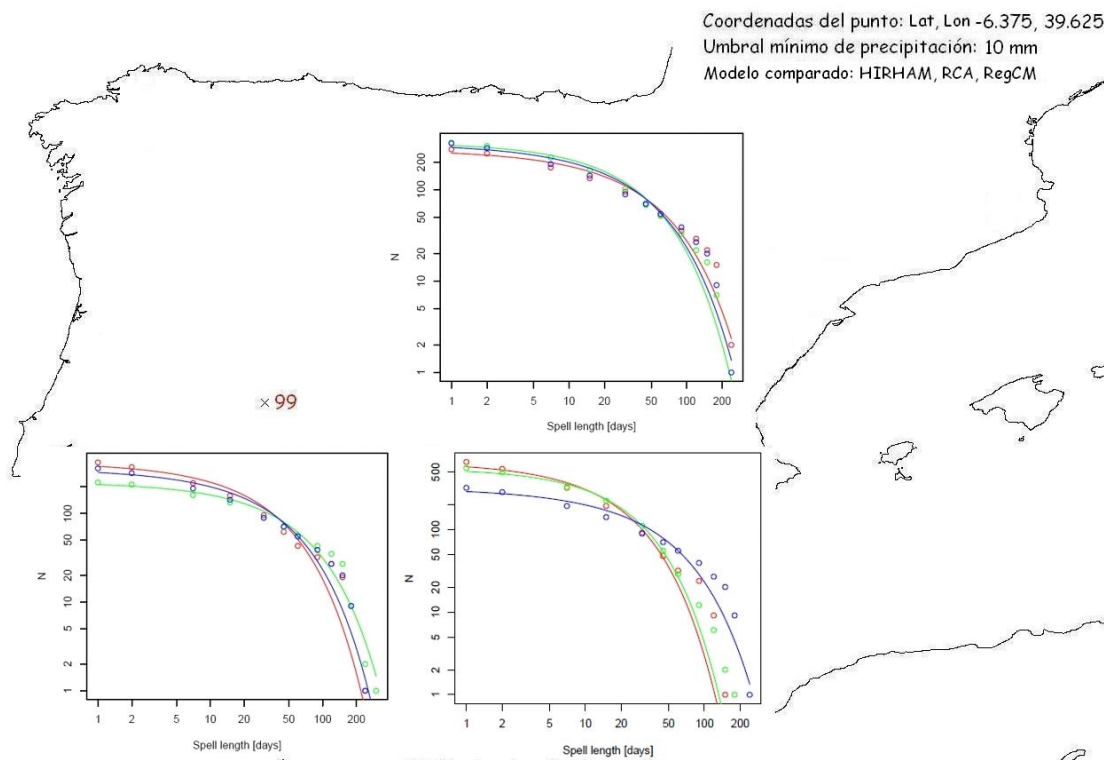


Fig. 4.57. 99\_REALES\_Vs\_MODELOS\_10

Para el punto 99 los datos que más se ajustan a la realidad parecen ser los del modelo RCA así como los procedentes de la línea de investigación RT3 del modelo HIRHAM para un umbral mínimo de precipitación de 1mm (Figura 4.56). Para un umbral mínimo de precipitación de 10mm (Figura 4.57), los RT2B del modelo RCA y los datos del modelo HIRHAM son los que mejor se ajustan.

# CAPITULO 5

## CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados obtenidos a lo largo del trabajo, se concluye que los tres RCM utilizados (HIRHAM, RCA y RegCM), presentan gran variabilidad respecto a las mallas de precipitaciones diarias obtenidas por interpolación desde pluviómetros para el período 1961-1990. Se debe destacar que en este sentido, se han contrastado los valores de precipitación media anual para la Península ibérica. Se ha observado un rango de variabilidad más acusado en el modelo HIRHAM, presentando una clara subestimación de la precipitación (*Figura 4.6*).

En el modelo RCA, aunque los porcentajes de variación son algo más reducidos también son elevados, se observan amplias zonas con sobreestimación de la precipitación. (*Figura 4.11*). Siendo el comportamiento más homogéneo, si se contrasta con el modelo anteriormente analizado HIRHAM.

Por último, en el caso del modelo RegCM se observan un rango menor de porcentaje variación [26,-73]. Al igual que el modelo RCA, se observan amplias zonas con sobreestimación de la precipitación (*Figura 4.16*).

Dado el comportamiento observado de los tres RCM, se concluye que en zonas montañosas presentan sobreestimaciones de la precipitación. Pero debe recordarse que justamente en estas zonas (Picos de Europa, Pirineos, Sierra Nevada, y otras), existen importantes falencias en las redes meteorológicas según se recoge en el Libro Blanco del Agua (MIMAM, 2000).

Aun así los resultados obtenidos al comparar los períodos 1991-2020, 2021-2050 y 2051-2080 con el período 1961-1990 línea de investigación RT2B, muestran en líneas generales un aumento de las precipitaciones en la franja Mediterránea y Cuenca del Ebro, mientras los mayores descensos de precipitación se presentan en la vertiente Cantábrica y Pirineos. En cambio, si se contrastan con el período 1961-1990, línea de investigación RT3, se observa un comportamiento contrario. Se presentan aumentos de precipitación principalmente en la vertiente Atlántica, y los mayores descensos de precipitación se centran en la vertiente Mediterránea.

En el caso del análisis de frecuencia y magnitud de rachas secas, se ha trabajado con dos umbrales de precipitación (1mm y 10 mm). Se han identificado las rachas secas de



duración mínima 1, 7, y 30 días, desde RCMs y las mallas de precipitación diaria real, para puntos seleccionados de la Península Ibérica.

Se observa de forma general, que el modelo HIRHAM es el que mejor se ajusta a la realidad, para umbral de precipitación de 1mm. El modelo RCA presenta igualmente un comportamiento adecuado, pero para menos puntos que el modelo HIRHAM. Para este umbral mínimo de precipitación (1 mm), el modelo RegCM es el que peor se comporta.

En cambio para un umbral mínimo de precipitación de 10 mm, el modelo RegCM tiene un comportamiento bastante cercano a la realidad para los puntos situados en la mitad sur de la Península Ibérica. Para el umbral 10 mm, el modelo HIRHAM en general, también se acerca bastante a la realidad. El modelo RCA se comporta de forma similar tanto para el umbral 10 mm como 1 mm.

En cuanto a la tendencia en la frecuencia y magnitud de las rachas secas, los modelos parecen mostrar en líneas generales un incremento para proyecciones futuras (al 2020, al 2050 y 2080). Siendo este aumento más acusado en los puntos ubicados en Norte de la Península Ibérica, frente a los del Sur. Aún así, las rachas secas que se registran en el Sur serán de mayor intensidad y se mostrarán con una mayor frecuencia que las que observan en puntos situados más al Norte.

Como conclusión final, se destaca que se ha avanzado en una línea de investigación prioritaria para la Región y España en general, que permitirá transferencias a la Sociedad en el corto plazo. Los resultados obtenidos podrán ser de explotación en la redacción y puesta al día de los planes hidrológicos de cuenca, contribuyendo así a mejorar la gestión racional y sostenible de los recursos hídricos.

# CAPITULO 6

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baraza Hermida, L.O, 2007. Proyecto Final de Carrera de Caracterización de la Sequía en la Cuenca del Rio Segura: Análisis de rachas secas.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W.,1994. Hidrología Aplicada. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana, S.A. Santa Fé de Bogotá, Colombia, 1994.
- García, S.G., 2009. Apuntes de Recursos Hídricos I. ITOP-Hidrología.
- Kerang Li y Xianchao Lin, 1993. Drought in China: Present Impacts and Future Needs. In: Drought Assessment, Management and Planning: Theory and Cases Studies, (Ed. Wilhite, D.), Kluwer Academic Publishers: 163-289
- MIMAM, 2000. Libro Blanco del Agua en España. Ministerio de Medio Ambiente. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas.
- Palmer, W.C., 1965. Meteorological drought. (45): 1-58. Weather Bureau, US Dept of Commerce. Washington DC, USA.
- Wilhite, D., 1993. The enigma of the drought. In: Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies, (Ed. Wilhite, D.), Kluwer Academic Publishers: 1-15.
- Desarrollo Sostenible,2009, online  
<http://www.dsostenible.com.ar/situacion-inter/esc00f1.jpg>
- DMI, 2009, online  
[http://www.dmi.dk/eng/index/research\\_and\\_development/introduction\\_climate.htm](http://www.dmi.dk/eng/index/research_and_development/introduction_climate.htm)

- ENSEMBLES PROJECT online, 2009  
<http://ensembles-eu.metoffice.com/>
- Marcos Valiente. O. 2009, online  
<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/176/17602604.pdf>
- Olcina, 1994, online  
[http://www.infoagro.com/hortalizas/relacion\\_clima\\_cultivo.htm](http://www.infoagro.com/hortalizas/relacion_clima_cultivo.htm)
- PRUDENDE PROJECT ,2009, online  
[http://www.cropsscience.org.au/icsc2004/poster/2/6/943\\_minguezmi.htm](http://www.cropsscience.org.au/icsc2004/poster/2/6/943_minguezmi.htm)
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Espa%C3%B1a#Clima>
- <http://grass.itc.it/>
- <http://hispagua.cedex.es/>
- <http://www.marm.es/>
- <http://www.r-project.org/>